



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

Corso di Dottorato in  
**Metodi, modelli e tecnologie per l'ingegneria**

curriculum Ambienti e tecnologie per l'attività motoria e la salute:

Ciclo XXXVI

**Il Focus dello Sguardo in Pista: Valutazione degli Indicatori  
Visivi sulle Prestazioni dei Piloti di Go-Kart**

SSD: (MPSI/01)

Supervisore  
Chiar.mo Prof. Pierluigi Diotaiuti

Dottorando  
Stefano Corrado

Chia.mo Prof.  
Fabrizio Marignetti

## **RINGRAZIAMENTI**

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine al Prof. Pierluigi Diotaiuti, il cui ruolo di coordinatore e supervisore del mio percorso di dottorato è stato fondamentale per il successo di questa ricerca. Vorrei inoltre ringraziare Tommaso Di Libero per il suo prezioso contributo nell'acquisizione dell'eye tracker, senza il quale questa ricerca non sarebbe stata possibile. Un sentito ringraziamento va a Sirio Lombardi per il suo supporto tecnico nel mondo del Karting, essenziale per la realizzazione di questo studio. Infine, desidero esprimere la mia riconoscenza ai colleghi Beatrice Tosti e Giuseppe Spica per il loro prezioso supporto e aiuto in laboratorio, contribuendo significativamente al successo di questo progetto. GRAZIE! Senza il vostro contributo, questa tesi non avrebbe potuto vedere la luce.

*“Continuo sempre più a imparare i miei limiti,  
i limiti del mio corpo,  
i limiti psicologici,  
è un modo di vivere per me”  
Ayrton Senna (1960-1994)*

# ABSTRACT

Il presente lavoro si configura quale esito di una ricerca esplorativa volta ad esaminare l'applicazione delle tecnologie di tracciamento oculare indossabile nell'ambito del motorsport, con particolare focus sul karting. Attraverso l'utilizzo del sistema di tracciamento oculare Neon sviluppato da Pupil Labs, lo studio mira a valutare l'efficacia di tale strumentazione in contesti ad elevata dinamicità, nonché a identificare eventuali variazioni nella percezione visiva in differenti condizioni di pista. Inoltre, si propone di analizzare le disparità di comportamento visivo tra piloti di go-kart con diversi livelli di esperienza. L'indagine condotta ha integrato un'analisi della letteratura esistente con una serie di studi sperimentali utilizzando la tecnologia di tracciamento oculare Pupil Labs nell'ambito sportivo, allo scopo di individuare le possibili variazioni introdotte da tale innovazione tecnologica. Sulla base delle più recenti scoperte e delle analisi esplorative effettuate utilizzando gli eye tracker, l'obiettivo primario del presente studio consiste nel comprendere l'impiego della visione da parte dei piloti durante le sessioni di allenamento con il nuovo sistema di tracciamento oculare "Neon", al fine di valutarne l'efficacia nelle scelte visive e strategiche effettuate in pista durante le varie sessioni.

I protocolli svolti hanno rivelato la presenza di modelli visivi specifici in grado di distinguere i piloti sulla base della loro esperienza, evidenziando come i piloti più esperti manifestino una maggiore efficacia nell'utilizzo della visione durante le sessioni di allenamento, anche in condizioni di pista bagnata. Tali risultati aprono prospettive innovative per lo sviluppo di programmi di formazione basati sul tracciamento oculare, volti a potenziare le capacità decisionali visive dei piloti meno esperti. Il fine ultimo di questa ricerca è individuare dati empirici che possano informare l'ottimizzazione delle strategie di allenamento nel karting, al fine di migliorare la sicurezza e le performance dei piloti attraverso un impiego più consapevole della tecnologia di tracciamento oculare. Inoltre, si auspica la futura elaborazione di algoritmi capaci di identificare schemi visivi

che possano mitigare i bias cognitivi e predire i momenti in cui i piloti potrebbero essere più efficaci o distratti durante le fasi cruciali dell'allenamento o della gara.

# SOMMARIO

ABSTRACT.....	1
Introduzione .....	1
CAPITOLO 1: Storia dell'eye tracking .....	4
Introduzione .....	4
1.1 XVII Secolo .....	4
1.2 XVIII Secolo.....	5
1.3 XIX secolo .....	6
1.4 XX secolo .....	7
1.5 Panoramica dei tracciatori oculari .....	9
CAPITOLO 2: Tecnologie e Applicazioni con l'Eye Tracking .....	15
2.1 Il tracciamento oculare.....	15
2.2 Campi indagati con il tracciamento oculare .....	16
CAPITOLO 3 La ricerca nel tracciamento oculare .....	18
3.1 Scelte e considerazioni nella ricerca scientifica .....	18
3.2 Aziende di settore del tracciamento oculare nella ricerca .....	19
3.3 Pattern visivi nel tracciamento oculare .....	20
3.4 Problemi tipici durante gli esperimenti.....	23
CAPITOLO 4 Le nuove Sfide nel tracciamento oculare .....	26
4.1 Dal laboratorio alla Realtà Virtuale .....	26
4.2 Il tracciamento oculare in ambienti naturali e dinamici .....	29
4.3 I Nuovi Tracciatori Oculari Indossabili .....	30
4.5 L'algoritmo di tracciamento oculare Pupil Labs .....	32

CAPITOLO 5 Pupil labs nello Sport: una revisione narrativa .....	35
Introduzione .....	35
Metodologia di ricerca .....	36
Caratteristiche degli studi .....	37
Risultati degli studi .....	39
Discussione .....	50
Conclusione .....	52
CAPITOLO 6 la valutazione del carico cognitivo con il tracciamento oculare .....	58
6.1 Introduzione .....	58
6.2 Dimensione della pupilla per quantificare il carico cognitivo.....	59
6.3 Interazione tra Stimoli Visivi, Carico Cognitivo e Risposta alla Luce.....	60
6.4 Pupillometria e Fatica visiva.....	63
CAPITOLO 7: Motorsport e Eye Tracking .....	68
7.1 Introduzione .....	68
7.2 Modello prestativo del Pilota Automobilistico.....	69
7.3 Aspetti Psicologici del Pilota Sportivo .....	70
7.4 Aspetti fisiologici del pilota sportivo.....	72
7.5 Tracciamento oculare e automobilismo sportivo.....	73
7.6 Conclusione .....	79
CAPITOLO 8 Studio Sperimentale: Valutazioni degli indici Oculari nel karting ....	80
Introduzione .....	80
8.1 Obiettivo dello studio (1) valutazione dello sguardo di un pilota di Go kart in condizioni di pista bagnata: una prova sperimentale con l’eye Tracker Neon della pupil labs. ....	85
8.1.2 Materiali e metodi.....	85
8.2 Obiettivo dello studio (2) valutazione degli indici dello sguardo in base all’esperienza su 20 piloti di Go kart.....	96
8.2.1 Procedura .....	96
8.2.2 Analisi statistiche analisi expertise tra piloti .....	97

8.2.3 Differenze Giro Pista Esperti/ non esperti. ....	98
8.2.4 Analisi settore Esperti/ Non esperti .....	112
8.2.5 Analisi Curva 1 Esperti/ Non esperti .....	122
8.2.6 Analisi Curva 9 Esperti/ Non esperti .....	137
8.3.1 Obiettivo dello studio (3) Analisi Esplorativa dei Parametri Oculari durante un Allenamento Prolungato di un Pilota di Go-Kart esperto.....	149
8.3.2 Metodologia .....	149
8.3.3 Analisi statistiche studio Pilota di Go-kart esperto.....	150
8.3.4 Risultati.....	150
8.4 Discussione .....	156
CONCLUSIONI .....	165
IMPLICAZIONI FUTURE.....	166
LIMITI DELLO STUDIO .....	167
LISTA DELLE TABELLE.....	168
BIBLIOGRAFIA .....	172

# INTRODUZIONE

La percezione umana costituisce il fondamento primario attraverso cui gli individui interagiscono con il mondo circostante. Questo processo intricato ha inizio nell'occhio, dove la luce impatta sulla retina e le informazioni vengono trasmesse al cervello a una velocità straordinaria, approssimativamente pari a 875.000 bit al secondo (Koch et al., 2006), una velocità equiparabile a quella di una connessione Internet standard. Tale rapidità consente al cervello di elaborare le informazioni visive attraverso aree coinvolte in processi cognitivi di diversi livelli di complessità. L'occhio, un organo complesso, ha avuto un'impronta significativa nello sviluppo di lenti e dispositivi ottici ampiamente utilizzati in settori quali la fotografia e la ricerca scientifica.

I movimenti oculari, tra i più comuni nei movimenti umani, emergono come risposta alla vasta mole di informazioni visive disponibili. Contrariamente a un'elaborazione globale, il sistema visivo umano seleziona e analizza rapidamente solo specifiche porzioni del campo visivo (Bridgeman, 1992; Treue, 2001). Nonostante il campo visivo umano abbracci approssimativamente 200°, la percezione dei dettagli precisi è limitata a un angolo di circa 2° (Levi et al., 1985). La fovea, responsabile della visione dettagliata, è in grado di muoversi fino a velocità di circa 500° al secondo, e durante tali movimenti la sensibilità visiva diminuisce quasi al punto di cecità (Thiele et al., 2002).

L'occhio, dunque, non rappresenta solo un organo sofisticato, ma è anche intimamente correlato alla velocità e alla precisione con cui il cervello elabora le informazioni visive. La rapida e mirata selezione di dettagli visivi tra una vasta gamma di stimoli sottolinea l'eccezionale capacità del sistema visivo umano di ottimizzare la percezione del mondo circostante.

Con il costante progresso delle tecnologie hardware e software, emerge la necessità di ridefinire i paradigmi interattivi tra l'umanità e la tecnologia. I tradizionali modelli di comunicazione unidirezionale devono evolversi verso esperienze multicanale, integrando

nuove forme di input e output. Attualmente, è possibile acquisire il contesto, le azioni e l'attenzione degli utenti attraverso una vasta gamma di sensori e schemi di utilizzo che monitorano i segnali emessi durante l'interazione con un sistema.

In particolare, il tracciamento oculare ha compiuto significativi progressi, spostandosi dai laboratori di ricerca ad applicazioni quotidiane e accessibili. Questa tecnologia consente di monitorare in tempo reale i movimenti oculari, aprendo nuove frontiere per designer e sviluppatori nella creazione di innovazioni che migliorano la comunicazione e l'interazione nel modo naturale in modo efficace.

La principale sfida attuale non risiede tanto nell'utilizzo degli strumenti di tracciamento oculare o nella loro complessità, bensì nell'esplorazione di nuove tecniche di interazione che integrino i movimenti oculari in sistemi avanzati di comunicazione uomo-computer. Tuttavia, la complessità fisiologica dell'occhio, i suoi movimenti e i potenziali difetti richiedono un'analisi dettagliata al fine di sfruttare appieno i vantaggi dell'interazione basata sullo sguardo e superare le sfide di implementazione.

In questo contesto, la presente tesi si propone di esplorare l'applicazione della tecnologia di Eye Tracking nel settore dello sport, concentrandosi in particolare sul motorsport. Quest'ultimo, che richiede un connubio di abilità fisiche e mentali, si configura come un terreno ideale per l'utilizzo delle tecnologie di tracciamento oculare al fine di analizzare e ottimizzare le prestazioni degli atleti/piloti. L'Eye Tracking, in questo contesto, offre una prospettiva unica per lo studio dei processi visivi che influenzano la guida. Tale studio si focalizza sull'utilizzo dell'Eye Tracking, nello specifico con la tecnologia Pupil Labs, nel karting, al fine di individuare le differenze visive tra piloti esperti e principianti.

Il karting, essendo una disciplina di base del motorsport, fornisce un ambiente ideale per analizzare le competenze visive essenziali di un pilota. La visione gioca un ruolo fondamentale nella percezione dell'ambiente durante gli allenamenti e le gare, nonché nella scelta delle traiettorie e nella risposta rapida ai cambiamenti delle condizioni di gara. L'Eye Tracking consente di registrare e analizzare i movimenti oculari in tempo reale, offrendo un'opportunità unica per lo studio delle strategie visive adottate dai piloti durante la guida.

## INTRODUCTION

Attraverso un'analisi dettagliata della letteratura esistente sul ruolo della visione nel motorsport e delle tecnologie di Eye Tracking precedentemente utilizzate, questa ricerca si propone di contribuire alla comprensione delle differenze visive tra piloti di diversi livelli nel karting. Utilizzando un approccio metodologico rigoroso, che include la raccolta e l'analisi dei dati attraverso l'Eye Tracker Neon, si intende identificare modelli visivi, differenze nei tempi di reazione e altre metriche significative che distinguono la visione dei piloti esperti da quella dei meno esperti.

L'obiettivo finale di questa ricerca è non solo ampliare la comprensione delle competenze visive nel karting, ma anche fornire dati pratici utili per lo sviluppo di programmi di formazione specifici e per ottimizzare le prestazioni dei piloti, contribuendo così all'evoluzione della valutazione visiva nel motorsport.

# CAPITOLO 1: STORIA DELL'EYE TRACKING

## Introduzione

L'Eye tracking, una tecnica che permette di tracciare lo sguardo e i movimenti oculari degli esseri umani e non solo, ha radici storiche che si estendono per secoli. È uno strumento prezioso per esplorare le interazioni tra la mente e il mondo esterno. Lo studio dei movimenti oculari, sostenuto da filosofi, scienziati e clinici lungo la storia, si è dimostrato fondamentale in svariati campi di ricerca, come evidenziato da numerose pubblicazioni (Moran et al., 2018; Larrazabal et al., 2019). Questi movimenti offrono una finestra sui processi cognitivi, distinguendosi per caratteristiche fisiche come velocità e tempi di reazione sui percorsi visivi tracciati dal sistema oculo-motorio degli individui. Essi sono regolati da tre coppie di muscoli estrinseci dell'occhio e modulati dall'attività di tre nervi cranici (Wade et al., 2003; Distler & Hoffmann 2011). La facilità con cui è possibile osservare e misurare questi movimenti ha aperto nuove e ampie prospettive di ricerca, ampliando significativamente il campo di studio e della ricerca.

### 1.1 XVII Secolo

Nel XVII secolo, le indagini sull'occhio generarono interrogativi sui suoi meccanismi e funzionamenti. In questo periodo, per molti ricercatori, la comprensione e la ricerca della visione oculare beneficiarono enormemente delle nuove conoscenze in ottica e anatomia dell'occhio. Tra i primi a studiare la visione fu Johannes Kepler (1571-1630), astronomo e astrologo tedesco considerato il fondatore dell'ottica moderna. Nel suo libro fondamentale "Ad Vitellionem Paralipomena, Quibus Astronomiae Pars Optica Traditur" (1604), analizzò la visione umana, ponendo le basi sui progressi scientifici futuri e gettò le basi sulla conoscenza della struttura e funzionalità dell'occhio umano (Simon, 1975).

Egli comparò la funzione dell'occhio a quella di una camera fotografica e gettò le basi per la creazione di un meccanismo che permettesse all'occhio di cambiare forma per mettere a fuoco oggetti a diverse distanze (Wade & Piccolino, 2009). Gli studi osservazionali condotti in questo periodo possono essere considerati i primi esempi scientifici sul tracciamento oculare. Scheiner (1573-1650) condusse esperimenti per dimostrare la reazione della pupilla a stimoli diversi (Daxecker, 1993). Egli, basandosi sul lavoro di Kepler, osservò che con la luce intensa la pupilla cambiava forma si restringeva, mentre in ambienti più scuri si dilatava, scoprendo così la reattività della pupilla agli stimoli luminosi. Lo stesso autore contribuì anche alla comprensione dell'accomodazione, osservando il restringimento della pupilla quando un piccolo oggetto si avvicina all'occhio e poi si allontana (Gal & Chen-Morris, 2010). Nonostante queste scoperte sul comportamento ottico di Kepler migliorassero la comprensione dei fenomeni ottici, queste evidenze non furono accettate a causa dell'influenza della religione e della chiesa sulla scienza in quel periodo. Descartes (1596-1650) utilizzò le ottiche di Kepler per spiegare la percezione degli arcobaleni e scoprire la legge della rifrazione, descrivendoli come la rifrazione (Cardona Suárez & Gutiérrez Valderrama, 2020). Sebbene usasse le teorie di Kepler, Descartes mantenne una visione tradizionale, attribuendo un ruolo privilegiato agli occhi. Si rese conto che i raggi di luce colpiscono tutte le superfici allo stesso modo, inclusi gli occhi. Descartes costruì così un modello fisico-sperimentale di rifrazione e proiezione con un prisma, contribuendo ulteriormente alla comprensione dei processi dell'occhio (Sabra, 1981).

## **1.2 XVIII Secolo**

Nel XVIII secolo iniziò l'espansione sperimentale del comportamento visivo grazie a un allentamento dell'influenza della Chiesa sul mondo scientifico. Gli scienziati dell'epoca furono orientati maggiormente verso la misurazione oggettiva dei movimenti oculari. In questo periodo, gli afterimages (sensazioni visive residue dopo la scomparsa dello stimolo) furono ampiamente utilizzati per studiare vertigini, accomodazione e visione binoculare (Garai & Horvath, 2020). Porterfield (1696–1771), un rinomato medico scozzese dell'epoca, fu il primo a usare il termine "accomodazione" riferendosi alla capacità dell'occhio di mettere a fuoco oggetti a diverse distanze (Wade, 2007).

Attraverso l'osservazione di un paziente afachico (senza cristallino), Porterfield dimostrò il ruolo del cristallino nell'accomodazione e sviluppò l'optometro per misurare i punti di vicinanza e lontananza della visione, uno strumento utilizzato fino a metà del XX secolo (Fuller, 1980, Wade, 2000). William Charles Wells (1757–1817), un medico americano, sostenne che la percezione della distanza visiva fosse appresa e non innata (Wade et al., 2011). Negli anni '90 del 1700, condusse esperimenti utilizzando fili colorati e metalli come stimoli, scoprendo che gli afterimages potevano indicare movimenti oculari volontari o involontari, una metodologia poi adottata da altri ricercatori (Wells, 1811). Parallelamente, lo studente di medicina Thomas Young (1773–1829) lavorò sull'accomodazione. Contrariamente alle teorie contemporanee, Young riteneva che il cristallino fosse muscoloso e che l'accomodazione avvenisse attraverso cambiamenti nella sua curvatura (Land, 2015).

### **1.3 XIX secolo**

Nel XIX secolo, la comprensione scientifica sia della struttura che della funzionalità dell'occhio andò sempre migliorando, e la ricerca sui movimenti oculari si basò su strumenti sempre più precisi. In questo periodo, le ricerche si focalizzarono sul Vertigo, con molti studiosi che cercarono di comprenderne i meccanismi. Per questa ragione vennero sviluppati rudimentali strumenti di registrazione oculare per misurare con maggiore precisione i movimenti oculari, molti dei quali richiedevano l'attaccamento di particolari oggetti fisici al bulbo oculare per permettere il tracciamento. Questi dispositivi sono i precursori degli attuali Eye Trackers (Young, 1801). In questo secolo, la ricerca sul Vertigo era particolarmente rilevante, con studiosi come Purkinje (1787–1869) che definì le condizioni per indurlo. Purkinje utilizzò sedie rotanti per indurre il Vertigo e osservò che era una conseguenza del conflitto tra azioni muscolari involontarie e volontarie dell'occhio (Cavero et al., 2017). Queste osservazioni portarono successivamente alla costituzione della legge del Vertigo di Purkinje (Yildirim & Sarikcioglu, 2007). Purkinje e Flourens (1794–1867) contribuirono anche alla comprensione dell'effetto dei canali semicircolari del bulbo oculare sull'equilibrio (Wade, 2010). Helmholtz (1821–1894), critico verso l'uso degli afterimages per la loro scarsa precisione, introdusse l'uso di una barra a morso per ridurre i movimenti della testa

e migliorare la precisione della registrazione dei movimenti oculari (Purves et al., 2001). Javal tentò di osservare i movimenti oculari durante la lettura usando gli afterimages, ma trovò il metodo inadatto, passando poi a dispositivi invasivi (Eibenberger et al., 2016). Huey (1898) tentò di misurare le saccadi osservando direttamente i movimenti oculari durante la lettura, ma incontrò difficoltà a causa della loro velocità (Huey, 1898). Verso la fine del secolo, Delabarre (1863–1945) propose un metodo per registrare i movimenti oculari attaccando un calco di gesso sopra la cornea per mappare fisicamente i suoi movimenti (Huey, 1898). Dodge (1899) adottò un approccio diverso, misurando i tempi di reazione oculare utilizzando la cronometria delle reazioni (Dodge, 1899). Queste scoperte fornirono importanti intuizioni sui meccanismi e le caratteristiche dei movimenti oculari, nonostante le limitazioni strumentali del secolo.

## **1.4 XX secolo**

Nel XX secolo, la ricerca sui movimenti oculari si è concentrata sulla validità e l'affidabilità dei metodi utilizzati in quel momento. La necessità di registrazioni più oggettive e accurate ha portato allo sviluppo di tecniche meno invasive come quelle fotografiche. Dodge proseguì le sue ricerche sui movimenti oculari, scoprendo il fenomeno della mascheratura saccadica (Erdmann & Dodge, 1898). Tuttavia, l'osservazione non era ancora sufficientemente precisa per indagare a fondo i movimenti precisi dell'occhio, pertanto gli studiosi di quest'epoca richiedevano metodi alternativi (Dodge R., 1900). L'evoluzione fotografica, introdotta da Dodge e Cline (1901), utilizzava la cornea come riflesso per migliorare la precisione delle registrazioni (Dodge & Cline, 1901). Questo metodo fu impiegato anche per comparare i movimenti oculari dei soggetti sani con i soggetti affetti da patologie mentali (Diefendorf & Dodge, 1908). Judd (1905) sviluppò un cinetoscopio per registrare i movimenti oculari, superando le limitazioni dell'epoca consentendo le registrazioni binoculari (Judd, 1905). Questi metodi furono applicati in diversi ambiti, dall'analisi della lettura allo studio di patologie come il balbettio (Jasper & Murray, 1932; Buswell, 1935). Nel corso del secolo, si sono affrontati problemi come l'accuratezza, la riduzione dei movimenti della testa e gli effetti degli ammiccamenti (Hartridge & Thomson, 1948). Hartridge e Thompson svilupparono un metodo indipendente dai movimenti della testa, mentre Lord e Wright (1948)

introdussero un sistema basato su celle fotoelettriche (Lord & Wright, 1948). In questo periodo avanzarono metodi basati sull'elettrooculografia (EOG), che avevano la capacità di misurare l'attività muscolare piuttosto che il movimento dell'occhio, furono realizzati da White, Eason e Bartlett nel 1962, e grazie al loro contributo le misurazioni risultarono più precise (White et al., 1962). Questi sviluppi hanno inseguito portato a tecniche simili a quelle moderne, come il primo sistema portatile di tracciamento oculare di Rockwell (1968) il sistema fu implementato per studiare i movimenti oculari dei conducenti (Rockwell et al., 1968; Mourant & Rockwell, 1970). Negli anni '70, il controllo degli stimoli visivi in funzione dei movimenti oculari permise nuove indagini sulla relazione tra visione periferica e movimenti oculari (McConkie & Rayner, 1975; McConkie et al., 1978). Queste tecniche hanno trovato applicazione in svariati ambiti, come i disturbi psichiatrici e i deficit di inibizione e danni al lobo frontale (O'Driscoll et al., 1992, Smyrnis et al., 1992 Levy et al., 2004; Takarae et al., 2004). Negli anni '90, la tecnologia di Eye tracking è stata integrata con la risonanza magnetica funzionale (fMRI), consentendo di confrontare le attività cerebrali con le misurazioni dei movimenti oculari in modo da identificare con precisione le aree cerebrali coinvolte (Kimmig et al., 1999). Nello stesso anno si scoprirono anche procedure informatiche sul controllo dei movimenti tramite movimenti oculari, utilizzando i potenziali elettrici registrati tramite EOG. Questi potenziali elettrici una volta trasformati in segnali elettrici vengono resi visibili e proiettati su schermo (Tecce et al., 1998). Quest'evoluzione ha permesso una comprensione più approfondita dei diversi tipi di movimenti oculari e di metriche. In questo periodo sono state implementate tecniche di tracciamento come il pursuit smooth, per studiare le popolazioni con disturbi clinici (Takarae et al., 2004). La scoperta dell'antisaccade, un movimento oculare lontano dallo stimolo, introdotto da Hallet (1978) ha permesso di indagare il deficit di inibizione e danni al lobo frontale (Gibaldi & Sabatini, 2021). Nella ricerca di precisione ha anche permesso di approfondire altre relazioni metriche come l'ampiezza e la velocità di picco durata una saccade, nota come latenza saccadica; e la dilatazione pupillare come indicatore dello sforzo cognitivo (Beatty & Kahneman, 1966). Con l'evoluzione tecnica degli strumenti di Eye tracking si è giunti a un livello elevato che ha di gran lunga migliorato significativamente la nostra comprensione sui movimenti oculari e sullo sguardo. Oggi è possibile indagare su più

fronti spaziando dalla neurologia alla psichiatria, fino alla ricerca sperimentale applicata. Oggi, l'Eye tracking ha trovato applicazioni versatili in numerosi ambiti. Oltre a essere utilizzato nella ricerca accademica tradizionale (Carpenter & Williams, 1995); viene utilizzato in ambito diagnostico (Vargas-Cuentas et al., 2017); nel design di tecnologie innovative che permettono l'interazione macchina/uomo (Poole & Ball, 2006); nella ricerca di nuove strategie di Marketing (Wedel & Pieters, 2017); e nel settore sportivo per fornire agli atleti vantaggi in termini di prestazione (Appelbaum & Erickson, 2018). Oggi, questa strumentazione è accessibile a un pubblico più ampio grazie ai costi contenuti, come dimostrato dalla diffusione dell'Eye tracker Tobii 4C (Tobii Tech, Svezia), che grazie alla presenza diffusa di laptop e personal pc ha esteso l'utenza anche a persone non esperte di settore. Con gli sviluppi informatici è stato possibile creare algoritmi che hanno permesso di trasformare webcam standard in Eye tracker in grado di fornire dati paragonabili ai tracciatori oculari molto più costosi (Simmelmann & Weigelt, 2018). Questa sezione ha riassunto la lunga e ricca storia dell'Eye tracking, passata dalla semplice osservazione fino alla realizzazione dei sofisticati Eye tracker di oggi. Questa evoluzione ha permesso una comprensione più profonda della sua funzione, del meccanismo e delle applicazioni nella ricerca (Duchowski, 2017).

## **1.5 Panoramica dei tracciatori oculari**

L'eye tracking, ha subito un'evoluzione significativa nel corso degli anni, grazie allo sviluppo di diversi dispositivi Eye tracker. I tracciatori oculari, come il P-CR, il DPI, e le bobine sclerali, sono alcuni esempi di questi progressi. Questa tecnologia presenta vantaggi e svantaggi uniche nel suo genere e ognuna di esse presentano caratteristiche differenti per effettuare misurazioni e analisi dello sguardo.

I tracciatori oculari P-CR basati su video, introdotti da Merchant nel 1967, dominano la ricerca attuale sul tracciamento oculare. L'acronimo P-CR si riferisce ai due parametri oculari indagati ossia la Pupilla (P) come centro dell'immagine nella camera di scena, e i centri riflessi della cornea (CR) rilevati dagli infrarossi. La direzione dello sguardo viene stimata in funzione delle posizioni di P e CR nel sistema di coordinate dell'apparato (Villanueva & Cabeza, 2008). Distorsioni di rilevamento come la rifrazione nella cornea, la dimensione nell'immagine della telecamera, l'occlusione possono interferire con il

rilevamento della pupilla. Inoltre, il colore chiaro dell'iride tende a ridurre la precisione di rilevamento di questi tracciatori oculari, a causa dello scarso contrasto tra pupilla e luce infrarossa (Tran & Kaufman, 2003). Livelli di illuminazione, frequenza di campionamento e lenti ottiche nella telecamera possono influenzare il CR. (Droege e Paulus 2010). Queste problematiche evidenziano come l'uso di telecamere oculari di bassa qualità possa ulteriormente degradare la precisione del segnale di sguardo, a causa dell'aggiornamento più lento dei pixel, che possono trattenere parte della luminosità della riflessione corneale passante, lasciando una traccia luminosa dietro la vera riflessione, rendendo poco accurato il calcolo del centro dell'immagine CR (Holmqvist & Andersson, 2017).

Un altro svantaggio della combinazione del segnale tra pupilla e riflesso corneale ha portato all'amplificazione delle oscillazioni post-saccadiche e a una sovrastima della velocità di picco (Hooge et al., 2016). Per questa ragione è stato dimostrato come questi tracciatori oculari mostrano chiare oscillazioni post-saccadiche (PSO), che rendono difficile tracciare un confine chiaro tra saccade e fissazione. (Nyström & Holmqvist, 2010; Larsson et al., 2013; Zemblys et al., 2019). Altri artefatti nel segnale CR derivano da variazioni nella posizione della testa rispetto al tracciatore oculare, che possono alterare la dimensione e la forma delle riflessioni corneali (Guestrin & Eizenman, 2006). Questi svantaggi sono stati in gran parte risolti mettendo in partiche nuove implementazioni che hanno suggerito varianti di questa tecnologia senza di tracciamento mediante algoritmi di deep learning. (Hooge et al., 2016; Holmqvist & Bignaut 2020).

In sintesi, i tracciatori oculari P-CR basati su video rappresentano una tecnologia dominante nel campo del tracciamento oculare, ma non sono esenti da limitazioni e sfide tecniche. Le interazioni tra componenti ottiche, elaborazione delle immagini e caratteristiche fisiche dell'occhio influenzano la precisione e l'accuratezza dei dati raccolti, ponendo sfide significative sia per i ricercatori che per i produttori dei tali dispositivi.

**DPI Eye Tracking:** Il sistema Dual-Purkinje Imaging (DPI) è un tracciante oculare analogico che stima lo sguardo basandosi sul movimento relativo al riflesso infrarosso sulla cornea rispetto al riflesso del cristallino (Crane & Steele, 1985). Il DPI è stato un importante strumento nei laboratori di psicologia, citato in pubblicazioni influenti come

Frazier e Rayner nel (1982) e Deubel e Schneider nel (1996). Nonostante la sua versatilità applicativa rispetto ai tracker P-CR, lo svantaggio del DPI è la sua natura ingombrante. Questo Eye tracker è stato costruito con optoelettronica degli anni '70 da un unico costruttore e la qualità dei dati che raccoglie sono riconducibili a un sistema sistema analogico Rucci et al. (2020).

il DPI a differenza del P-CR trova il centro dello sguardo grazie a un fascio luminoso analogico. Questo potrebbe spiegare perché il DPI non misura erroneamente le ampiezze dei piccoli movimenti oculari (Holmqvist & Blignaut, 2020).

Il DPI registra segnali di sguardo con una qualità sufficiente per rilevare il tremore, la deriva oculomotrice e le microsaccadi con buona affidabilità (Holmqvist & Blignaut, 2020; Ko et al., 2016; Poletti & Rucci, 2016).

Holmqvist è riuscito a dimostrare con precisione mediana di  $0.008^\circ$  e un'accuratezza di  $0.4^\circ$  rispetto a qualsiasi sistema P-CR. Nonostante questa affidabilità, la qualità dei dati DPI è generalmente inferiore quando si registrano partecipanti con pupille piccole causando imprecisioni e perdita dei dati (Crane & Steele, 1985; Holmqvist et al., 2020).

Per questo motivo i DPI sono preferibili usarli con partecipanti che hanno grandi pupille, e con pupille artificialmente dilatate (Deubel & Bridgeman, 1995).

I DPI, nonostante alcune limitazioni, si distinguono per la loro capacità di registrazione di segnali di alta qualità, ma il suo utilizzo è ottimizzato con soggetti di nicchia che hanno grandi pupille.

**Scleral Search Coils:** Il tracciamento oculare mediante bobine sclerali è stato introdotto da Robinson nel 1963 e adattato per l'uso umano da Collewijn et al. nel 1975. Rappresenta una tecnica fondamentale nella ricerca neuro-oftalmologica e neurologica. Questa tecnologia impiega una bobina di rame inserita in un anello a forma di lente a contatto che una volta collocata sulla sclera dell'occhio, va a registrare l'orientamento dell'occhio rispetto ai campi magnetici indotti dalla bobina stessa. Collewijn nel 1998 ha definito questa tecnica come la tecnica più accurata nel tracciamento oculare.

Rispetto ad altri metodi i sistemi a bobina sclerale offrono la possibilità di registrare ad alta frequenza di campionamento e tracciare simultaneamente la rotazione dell'occhio e della testa (Collewijn et al. nel 1985. Reulen e Bakker nel 1982 Bour et al. nel 1984).

Gli studi di Houben et al. nel (2006) e Ko et al. nel (2016) hanno dimostrato la superiorità della precisione dei sistemi a bobina rispetto ai tracciatori DPI, specialmente nella registrazione dei movimenti oculari intersaccadici. Gli autori hanno dimostrato scientificamente come le bobine possono influenzare la velocità dei movimenti saccadici (Frens & van der Geest, 2002; Träisk et al., 2005). Questi sistemi sono considerati più accurati nel misurare la velocità saccadica rispetto ai tracciatori P-CR i quali tendono a sovrastimare tale velocità (Hooge et al., 2016).

Nonostante la loro precisione, i sistemi a bobina sclerale sono invasivi e possono causare effetti collaterali come riduzione temporanea dell'acuità visiva, deformazione del campo visivo e visione offuscata (Irving et al., 2003; Duwaer et al., 1982; Arend & Skavenski, 1979). Tuttavia, i modelli contemporanei, inseriti in lenti a contatto flessibili, sono stati migliorati per ridurre questi effetti negativi. Sebbene la metodologia delle bobine sclerali presentino sfide, rimane una tecnologia di alta precisione, fondamentale per la ricerca e la diagnostica in ambiti specifici dove movimenti incontrollati della testa e del corpo sono frequenti.

**EOG:** Rispettivamente Nel 1922 e nel 1929 Schott e Meyers furono i primi in grado di registrare in senso orizzontale lo sguardo umano utilizzando il principio del potenziale corneo-retinico scoperto nel 1849 da Du Bois-Raymond. Attraverso elettrodi posizionati ai lati degli occhi, è possibile individuare lo sguardo tramite un campo elettromagnetico generato dal potenziale elettrico corneo-retinico di 10-30mV (Brown et al., 2006). Una volta che il segnale viene trasformato e amplificato registra il tracciato su carta o computer. L'EOG è un metodo analogico e può essere integrato con altri dispositivi di registrazione come elettroencefalogrammi digitali (EEG).

Questo Eye Tracker viene spesso utilizzato in studi clinici di laboratorio molti ricercatori usano questa metodica al fine di registrare dati elettroculografici in pazienti clini. (Brown et al. 2006).

Il protocollo previsto per registrare i dati con il sistema EOG è molto complesso e prevede la dilatazione della pupilla indotta e la preparazione della pelle per l'applicazione dei due elettrodi ai lati di ciascun occhio e di un elettrodo di riferimento in posizione (CZ). Successivamente visto che il potenziale corneo-retinico varia con la luminescenza. il

soggetto che partecipa alla sperimentazione osserva per 15 minuti bersagli di fissazione deboli al buio, seguiti da una fase luminosa della stessa durata. Questa sequenza buio-luce influenza il potenziale corneo-retinico generando i dati.

Gli EOG possono essere utili quando si devono studiare movimenti ampi degli occhi, ma mostrano delle imprecisioni rispetto agli attuali di eye tracking. Un vantaggio specifico degli EOG è l'accuratezza dello strumento, insieme alla capacità di registrare i movimenti oculari quando gli occhi sono chiusi, durante gli studi del sonno REM, (Aserinsky & Kleitman, 1953; Young & Sheena nel 1975).

Nonostante il suo versatile utilizzo in diverse situazioni, gli EOG presentano caratteristiche di precisione inferiore rispetto ad altri sistemi di Eye tracking in quanto richiedono una procedura di misurazione standardizzate per ottenere dati di alta qualità.

**Limbus Tracking:** Török e colleghi nel 1951 pubblicarono la prima implementazione di un "limbus tracker" basato su fotocellule. Questo Eye tracker è in grado di stimare il confine tra l'iride e la sclera nell'occhio umano, permettendo di monitorare il movimento dell'occhio in base alla posizione del limbo, utilizzando video o fotosensori. Fino al 2000 la *Skalar company* vendeva limbus eye tracker basati su fotodiodi per scopi di ricerca, ma ora sono noti principalmente per dispositivi laser di controllo guidato per interventi chirurgici ell'occhio (Arba-Mosquera & Aslanides, 2012).

Ci sono anche altri Eye tracker come gli Ober Saccadometer, simili ai limbus tracker, che tracciano i movimenti oculari tramite il rigonfiamento corneale utilizzando fotosensori (Holmqvist & Andersson, 2017).

I limbus trackers basati su sensori a video sfruttano il confine tra l'iride e la sclera per individuare la posizione a schermo dello sguardo. Questi Eye Tracker hanno una particolarità ovvero non sono soggetti ad artefatti della pupilla, come lo sono i sistemi DPI e P-CR, e la loro rifrazione corneale non comporta alcun problema di rilevamento. Gli Eye tracker che presentano telecamere a bassa risoluzione possono offrire un vantaggio significativo. Lo svantaggio di questo Eye tracker è costituito dall'occlusione del limbo da parte della palpebra.

Il funzionamento base di questo Eye tracker costituisce il principio principale di funzionamento degli attuali Eye tracker indossabili disponibili in commercio.

**Piezolectric Eye Tracking:** la trasduzione piezoelettrica, introdotta per la prima volta da Bengi e Thomas nel 1968, ha previsto l'uso di un bimorfo piezoelettrico che produce segnali di tensione, attraverso i quali è possibile rilevare microsaccadi orizzontali e tremori oculomotori (McCamy et al., 2013).

**Retinal Image-Based Eye Tracking:** il tracciamento computazionale sulle caratteristiche retiniche, come il disco ottico, vasi sanguigni e altre strutture più piccole, è stato introdotto per la prima volta da Cornsweet nel 1958. Questo strumento utilizza algoritmi di visione artificiale per analizzare il movimento delle immagini retiniche per stimare i movimenti oculari. I sistemi di tracciamento basati su immagini retiniche sono tra i più accurati e precisi. Il primo sistema simile è stato costituito da Cornsweet nel (1958) dove ha avuto modo di rilevare le microsaccadi con una precisione di 0,0028 gradi lungo un solo asse. Putnam et al. nel 2005 hanno ottenuto risultati ancora più accurati sulla precisione della posizione dello sguardo ovvero 0,0014 utilizzando un sistema a telecamera retinica.

I sistemi di eye tracking basati su immagini retiniche più veloci e precisi sono costruiti preferibilmente utilizzando immagini a scansione, in particolare tramite oftalmoscopi a scansione laser (SLO). Questi strumenti sfruttano il principio del “rolling shutter” per recuperare il movimento dell'occhio (Shenoy et al 2021).

I sistemi di tracciamento basati su immagine retinica hanno un'ampiezza di misurazione limitata rispetto ad altri tipi di Eye tracker e sono principalmente utilizzati in contesti oftalmologici per studiare patologie retiniche e indagare gli effetti sulla visione durante i movimenti oculari. L'accuratezza di questi strumenti può essere influenzata da distorsioni di rilevamento del segnale. Per risolvere questo problema di accuratezza e di precisione ulteriori sforzi sono stati compiuti per correggere tali distorsioni offrendo una precisione elevata ma con una limitata ampiezza di misurazione (Bedggood & Metha 2017).

# **CAPITOLO 2: TECNOLOGIE E APPLICAZIONI CON L'EYE TRACKING**

## **2.1 Il tracciamento oculare**

L'Eye tracking è una tecnica che permette di studiare e analizzare i movimenti degli occhi e la direzione del loro sguardo. Questo metodo riesce a rilevare le aree in cui gli occhi si posano nello spazio rispetto a un particolare stimolo visivo. Questa metodica viene realizzata mediante dispositivi fissi o indossabili chiamati Eye Tracker.

Questi dispositivi seguono la posizione e il movimento degli occhi nel corso dell'attività svolta. Si presentano come strumenti sofisticati, che hanno al loro interno telecamere e tecnologia a infrarossi per raccogliere i dati dettagliati dei movimenti degli occhi. Il tracciamento avviene solitamente attraverso sofisticati processi non invasivi. Le telecamere a infrarossi posizionate sotto il setto nasale, nel caso degli eye tracker indossabili, tracciano la pupilla, catturano il riflesso della cornea e forniscono tramite coordinate (x e y) i punti di fissazione dello sguardo dell'occhio nel campo visivo (Raghavendran & Vadivel, 2023). I dati che vengono processati vengono raccolti da software specifici per ottenere informazioni specifiche. Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi metodi di tracciamento. Tra le metodologie troviamo: l'Elettro-Oculografia (EOG), che si basa sulla misurazione delle differenze di potenziale elettrico attorno all'occhio, registrando potenziali tra 15 e 200  $\mu\text{V}$ . Questa tecnica, nonostante sia stata la prima a essere indagata, mostra delle limitazioni sulle capacità di misurazione in quanto i movimenti oculari vengono rilevati in base alla posizione della testa del soggetto (Estrany & Fuster-Parra, 2022).

La Foto-Oculografia (POG) e Video-Oculografia (VOG) sono tecniche che misurano aspetti distintivi dell'occhio, come la forma della pupilla e i riflessi corneali. Queste tecniche generano risultati efficaci soltanto quando vengono rispettate condizioni statiche della testa (Boening et al., 2006; Duchowski, 2017). Infine, altre tecniche utilizzate hanno riguardato le lenti a contatto sclerali, che offrono una metodologia di alta precisione ma invasiva per chi la utilizza. Questa tecnica di tracciamento oculare consiste nel rilevare i movimenti con l'utilizzo di lenti a contatto equipaggiate con sensori di rilevamento delle pupille. Nonostante l'alta precisione, la necessità di inserire le lenti all'interno delle palpebre crea un disagio consistente per l'utente (Massin et al., 2020). Le tecniche POG e VOG sono parte della foto/video-oculografia, che include vari metodi basati sulla misurazione di caratteristiche riconoscibili degli occhi durante i loro movimenti, come la forma della pupilla, il confine tra la sclera e l'iride, e i riflessi corneali prodotti da fonti luminose a infrarossi. Le misurazioni vengono effettuate tramite sequenze fotografiche o video, in modalità automatica o manuale. L'uso combinato dei riflessi corneali e pupillari consente una stima precisa della direzione dello sguardo, distinguendo i movimenti della testa da quelli dell'occhio. Ciò viene realizzato utilizzando i riflessi corneali prodotti da una o più fonti di luce infrarossa (invisibili all'utente) per tracciare e individuare il centro della pupilla come punto di riferimento. Ad oggi sono disponibili dispositivi da tavolo (simili ai monitor LCD tradizionali) e dispositivi indossabili, come caschi o occhiali attrezzati. Una volta identificata la posizione della pupilla (bright pupil), la direzione dello sguardo viene calcolata mediante i riflessi corneali, noti anche come immagini di Purkinje (Min-Allah et al., 2021). Per ottenere una posizione ottimale dello sguardo viene effettuata una calibrazione iniziale. In questo passaggio vengono stabilite le correlazioni tra i punti osservati dal soggetto (per esempio su uno schermo) e la posizione dei riflessi sulla cornea, in modo da stimare in modo accurato la direzione dello sguardo.

In questo modo, l'eye tracking fornisce un mezzo efficace e non invasivo per studiare i movimenti oculari e la direzione dello sguardo, contribuendo significativamente alla ricerca in vari campi (Kowler, 2011).

## **2.2 Campi indagati con il tracciamento oculare**

L'Eye tracking svolge un ruolo cruciale, fornendo insight preziosi sul comportamento visivo e fornisce preziose risposte in ambito cognitivo. Gli occhi giocano un ruolo fondamentale nell'interazione delle persone con il loro ambiente, essendo essenziali per l'esplorazione visiva e la gestione di vaste informazioni. I loro movimenti sono guidati da complessi meccanismi neurali che coinvolgono diverse aree e percorsi del cervello, nonché processi visuo-cognitivi in molteplici centri cerebrali (Leigh & Zee, 2015). Nel corso degli anni, la capacità di tracciare e analizzare i movimenti oculari si è notevolmente sviluppata, portando allo sviluppo di tecnologie sempre più avanzate e non invasive che vengono usate per campionare dati ad alta velocità (Duchowski, 2007; Krafka et al., 2016; Gibaldi et al., 2017). Nel corso degli anni si sono evidenziate alcune principali in campo accademico per studiare il comportamento visivo e cognitivo.

L'eye tracking è stato impiegato in discipline come la psicologia, la neuroscienza, la linguistica e la scienza cognitiva per indagare processi come la lettura, l'attenzione visiva, la percezione e la memoria (Liu & Heynderickx 2011; Popa et al., 2015; Herten & Wolf 2017;).

In ambito medico, l'Eye tracking è stato utilizzato per diagnosticare e monitorare disturbi neurologici e psichiatrici come il disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD), la schizofrenia, il disturbo dello spettro autistico (ASD) e i traumi cerebrali (García-Baos et al., 2019; Kiderman et al., 2020; Lev et al., 2022). In questo ambito si è visto come molti ricercatori utilizzino i movimenti oculari come biomarcatori nelle valutazioni diagnostiche (Bedell & Stevenson, 2013; Li et al., 2023). Un altro ambito è l'Interazione uomo-macchina: L'Eye tracking risulta uno strumento fondamentale nello sviluppo di interfacce uomo-macchina. Può essere impiegato per migliorare l'usabilità di dispositivi tecnologici, come computer, smartphone, dispositivi di realtà aumentata e realtà virtuale, consentendo il controllo del dispositivo tramite il movimento degli occhi (Chandon et al., 2006; Schmitt et al., 2014; Murch et al., 2020; Xenos et al 2024). Un altro ambito molto indagato è la ricerca di mercato: Le aziende utilizzano l'Eye tracking per valutare l'efficacia delle loro campagne pubblicitarie, del design dei prodotti e dell'esperienza degli utenti (Simmonds et al., 2020; Pfiffelmann et al., 2020). Questa tecnica fornisce informazioni dettagliate su cosa attira l'attenzione degli utenti e come reagiscono agli stimoli visivi. Di recente è sempre più evidente l'indagine sulla formazione e

l'apprendimento (Wang& Harter 2021). L'Eye tracking viene utilizzato per valutare l'attenzione degli studenti durante le lezioni e le attività di apprendimento (Wyss et al., 2021). Può essere utilizzato anche per sviluppare strumenti educativi personalizzati che tengono conto del comportamento visivo degli studenti (Jarodzka et al 2021). Infine lo sport e le prestazioni fisiche: Nel campo dello sport, l'Eye tracking può essere utilizzato per analizzare le prestazioni degli atleti durante l'allenamento e le competizioni (Laby et al., 2021). Può aiutare allenatori ed esperti di settore a ottimizzare le strategie di addestramento e le tattiche di gioco degli atleti, nonché a identificare aree di miglioramento per gli atleti (Jacob & Karn, 2003). In sintesi, l'Eye tracking è una tecnologia versatile che ha rivoluzionato diversi settori, consentendo una comprensione più approfondita del comportamento umano e fornendo soluzioni innovative per migliorare le prestazioni, la comunicazione e l'esperienza degli utenti. Questi aspetti rendono uno strumento prezioso per diagnosi e monitoraggio delle funzioni neurali o visive (Holmqvist et al., 2011). Con l'evoluzione continua della tecnologia e la sua applicazione in vari settori, emergono sfide nella sua implementazione e nello sviluppo metodologico.

## **CAPITOLO 3 LA RICERCA NEL TRACCIAMENTO OCULARE**

### **3.1 Scelte e considerazioni nella ricerca scientifica**

Nel campo della ricerca scientifica esistono una varietà di dispositivi con diverse architetture e caratteristiche, il che può portare a complesse elaborazioni per chi desidera iniziare protocolli sperimentali di ricerca con questa tecnologia. La scelta di un Eye tracker dipende dal tipo di ricerca e protocollo che si vuole eseguire. (Cognolato et al., 2018; Sharafi et al., 2020). Per un ricercatore o un esperto di settore i parametri da acquisire sono vincolati dalla frequenza di campionamento e dall'accuratezza dei dati.

I risultati migliori, sono stati riscontrati con i dispositivi (VOG). Grazie a questi dispositivi è possibile raggiungere alti valori di precisione. Il livello di precisione prodotto da questo strumento è sufficiente a stimare correttamente le coordinate del punto di fissazione, per analizzare micromovimenti oculari come tremori o microsaccadi.

Gli Eye tracker remoti sono molto utilizzati nella ricerca e riportano un'accuratezza di circa 1°. I dati che forniscono variano a seconda delle caratteristiche del campione. Le variabili come la forma il colore degli occhi o l'illuminazione del setting sperimentale fanno la differenza sull'accuratezza dei risultati prodotti.

Gli Eye tracker indossabili, sebbene possano avere un'accuratezza simile a quella dei dispositivi montati a schermo, sono meno precisi a causa di fattori come l'illuminazione variabile e i grossi movimenti prodotti dal soggetto durante il task sperimentale (Życzkowski et al., 2012). Per questi tipi di dispositivi è di fondamentale importanza ricordare che l'accuratezza può variare significativamente tra i protocolli di ricerca condotti il che potrebbe portare a un alto numero di artefatti e a registrazioni di bassa qualità. In termini di precisione per uno studio sperimentale la costante di interesse in termini di coerenza viene data dall'occhio che deve essere fisso e diretto verso una direzione precisa.

Il secondo parametro nella ricerca è la frequenza di campionamento dell'Eye tracker, ovvero quante posizioni oculari possono essere registrate al secondo. Gli Eye tracker di fascia bassa hanno una frequenza di 30 Hz o 60 Hz, adeguata a protocolli semplici di mappatura oculare (Diaz-Tula et al., 2017). Tuttavia, per analizzare le saccadi o i micromovimenti oculari, sono necessarie frequenze molto più elevate (Andersson 2010). Gli eye tracker più veloci raggiungono una frequenza di campionamento di 2000 Hz, mentre altre modalità come la bobina sclerale o IROG possono essere più veloci come gli Eye tracker binoculari OBER-2 IROG che possono raggiungere frequenze di 4 kHz (Ober et al 1997).

## **3.2 Aziende di settore del tracciamento oculare nella ricerca**

Il mercato degli Eye tracker per la ricerca è dominato da poche aziende di settore che mettono a disposizione un numero ridotto di Eye tracker. La leader indiscussa è la Tobii,

fondata in Svezia nel 2001, essa offre una vasta gamma di dispositivi, che vanno dai modelli da laboratorio fino ai modelli più evoluti che permettono di realizzare protocolli più evoluti con dispositivi indossabili.

Un'altra azienda degna di nota è la tedesca SMI (Senso-Motoric Instruments), che offre una vasta gamma di eye tracker per la ricerca. Questa azienda è stata acquisita da Apple nel 2017 e ha cessato di esistere recentemente (Farnsworth 2020). Da qualche anno l'azienda tedesca Pupil Labs è entrata a pieno titolo in questo settore. La Pupil Labs nata come azienda digitale sul tracciamento oculare produce sofisticati Eye tracker indossabili e software avanzati, per ricercatori di settore. Gli sviluppatori si sono concentrati sull'elaborazione di un sistema eye tracking mobile e accessibile, denominato Pupil, che combina headset leggeri per il tracciamento dell'occhio insieme a software open source per l'analisi (Kassner et al., 2014).

Pupil si distingue per la sua configurazione hardware che include telecamere ad alta risoluzione per la stima dello sguardo monoculare e binoculare, e per il suo software indipendente che grazie ad alcuni tools è possibile fare analisi in tempo reale.

Un aspetto notevole di tale Progetto è il suo approccio open source che promuove un ambiente di sviluppo collaborativo e democratico. L'azienda offre ai giovani ricercatori un costante confronto con gli più esperti tramite forum on-line. Questo servizio oltre a chiarire le problematiche riscontrate, fa mettere a disposizione le competenze degli sviluppatori per risolvere i problemi di indagine.

La facilità di accesso e la personalizzazione del sistema permettono una più ampia partecipazione e sperimentazione sul campo, permettendo di accelerare l'avanzamento della ricerca. Il progetto di Pupil Labs si pone come una pietra miliare nel campo del tracciamento, grazie al suo impegno e alla sua innovazione sempre aperta. La sua piattaforma ha il potenziale di rivoluzionare il modo in cui fa ricerca.

### **3.3 Pattern visivi nel tracciamento oculare**

Nella ricerca è cruciale prestare attenzione ai dati e ai parametri offerti dagli Eye Trackers. Questi dispositivi, generalmente sono accompagnati da software per l'analisi dati (Ghose et al., 2020). Di norma, per un'analisi più approfondita e affidabile è necessario l'ausilio dell'inferenza statistica nell'individuare e ad analizzare diverse

metriche. L'eye tracking è una tecnologia che inizialmente misura punti di sguardo, chiamati "gaze points", con una frequenza di campionamento determinata dalla velocità dell'eye tracker. Le posizioni di tali punti, chiamati "position measures", si verificano solo quando lo sguardo rimane fermo su un oggetto o una posizione entro un angolo visivo di 3° per almeno 100 ms (Panchuk & Vickers 2006). Questi punti, indicati come "fissazioni", rappresentano l'unità base di misurazione se si considerano frequenze di campionamento di 120 Hz (Vickers 2007).

### **3.3.1 Fissazioni**

Le fissazioni sono fondamentali per il processo visivo, in quanto consentono di elaborare le informazioni fornite da un oggetto o una posizione stabilizzando il punto di interesse sulla retina durante un compito visivo. L'analisi delle fissazioni permette di valutare processi cognitivi e fisiologici, come la durata associata a processi di attentivi, percettivi della scena visiva. Inoltre si è visto come la durata delle fissazioni tende ad aumentare quando la comprensione di un elemento visivo è di difficile lettura e diminuisce quando è più semplice (Henderson & Choi, 2015). Le fissazioni possono anche essere più lunghe e avvenire precocemente; ciò si verifica durante il "quiet-eye period", che rappresenta un periodo di fissazione prolungata su un singolo punto prima di una situazione critica o di un movimento diretto verso uno scopo (Vincze et al., 2020).

I punti dello sguardo di un individuo cambiano posizione continuamente dando vita a consueti movimenti oculari saccadici. Questi movimenti, che avvengono migliaia di volte ogni giorno, sono fondamentali per cambiare in modo rapido il focus. Si stima che le saccadi, che durano tipicamente tra i 20 e i 40 ms., avvengano circa tre volte al secondo durante lo stato di veglia, dando prova della loro ubiquità durante le attività visive quotidiane (Unema et al., 2005).

### **3.3.2 Saccadi**

Le saccadi sono movimenti oculari rapidi che giocano un ruolo fondamentale nelle strategie di ricerca visiva. Questi movimenti si verificano in un intervallo angolare che va da 1 a 40° con una velocità di 600° al secondo. Sono movimenti in grado di cambiare rapidamente il punto di attenzione nell'ambiente circostante reindirizzando la nostra attenzione su diversi punti di interesse (Raab, 1985).

Tra questi movimenti, le fissazioni, si posano momentaneamente su un bersaglio in un tempo inferiore o maggiore a 100 ms. Questa pausa è fondamentale per fornire una visione dettagliata, dato che l'acuità visiva non è uniforme in tutta la retina. La fovea, una piccola regione al centro della macula, fornisce una visione centrale ad alta risoluzione e le saccadi permettono di portare al centro di interesse le immagini fornite da questa visione foveale per una percezione più chiara (Murray et al., 2022).

L'elaborazione delle informazioni visive viene soppressa durante le saccadi. Questo fenomeno, noto come soppressione saccadica, comporta un breve declino nella sensibilità visiva mentre gli occhi si spostano da un punto all'altro. Di conseguenza, le immagini che appaiono durante una saccade non vengono percepite. Questo aspetto sottolinea la complessità del sistema visivo e dei suoi meccanismi di elaborazione.

La latenza saccadica, l'intervallo di tempo tra la presentazione di uno stimolo e l'inizio di una saccade, è un parametro cognitivo-fisiologico importante. Coinvolge diversi processi, tra cui lo spostamento dell'attenzione visiva verso il nuovo bersaglio, il disimpegno della fissazione oculomotoria e il calcolo delle metriche del movimento (Robinson, 2022).

Il circuito neurale attivato durante questo periodo è esteso, comprendendo aree dalla retina alla corteccia visiva, e include la corteccia parietale, il lobo frontale, il collicolo superiore, il tronco cerebrale e i muscoli extraoculari (Pouget, 2015). Le prestazioni saccadiche possono essere influenzate da fattori neurologici come l'im maturità, la degenerazione o il malfunzionamento di alcune aree. Inoltre si presume che la latenza saccadica varia con l'età, in quanto aumenta negli adulti anziani in seguito a cambiamenti neurologici (Yang et al., 2002; Bonnet et al., 2013).

Attraverso queste intuizioni, diventa evidente che i movimenti oculari saccadici non sono semplici occorrenze fisiologiche ma sono profondamente radicati nel tessuto dei nostri sistemi di elaborazione cognitiva e visiva. Il loro studio non solo permette di migliorare la comprensione nei meccanismi visivi di base, ma getta anche luce su aspetti neurologici e di sviluppo più ampi della cognizione umana. Per questo motivo la ricerca si è spinta verso l'utilizzo di software che possono trasformare fissazioni e saccadi oculari in rappresentazioni grafiche (mappe di calore, beeswarm, scan paths ecc...) che aiutano il ricercatore a visualizzare le aree di maggiore interesse (Kurzahls & Weiskopf, 2013).

### **3.3.4 Scan Paths**

I percorsi di scansione e le sequenze dei punti di fissazione offrono una comprensione dettagliata del modo in cui l'attenzione si sposta all'interno di una scena; le *scan paths* rappresentano l'ordine progressivo delle fissazioni delle aree più visionate dal soggetto della sperimentazione.

Duchowski e colleghi hanno applicato l'algoritmo di clustering K-Means per suddividere i percorsi di scansione oculare. Questa suddivisione è stata effettuata utilizzando sia analisi di clustering gerarchico che non gerarchico. Nel processo di analisi dei cluster, hanno utilizzato punteggi standardizzati per le variabili osservate, che includono la posizione dei punti in cui gli occhi si fermano durante la scansione e il suo relativo numero nel percorso. Questo approccio ha consentito di raggruppare i dati in modo significativo e di identificare modelli o sottogruppi all'interno dei percorsi di scansione oculare (Duchowski et al., 2010).

### **3.3.5 AOI**

Le aree che mostrano un addensamento di questi punti possono far parte di aree di maggior focus che prendono il nome di AOI (*Areas of Interest*). Esse sono porzioni dello scenario definite per calcolare dati statistici di interesse (Lagmay & Rodrigo, 2022). Solitamente vanno a includere tutte le fissazioni entro un'area dettagliata d'interesse ed escludono quelle verso altre aree. Per farlo vengono riconosciuti due metodi principali: uno basato sul significato e l'altro sulla suddivisione sistematica. Nel primo caso, ciascuna AOI viene assegnata a un significato specifico, mentre nel secondo caso l'area visiva viene divisa in zone in modo più strutturato (Orquin et al., 2016). La scelta tra questi metodi può essere influenzata dai dati raccolti basandosi sui punti di maggiore interesse, oppure stabilita in anticipo prima della raccolta dei dati. La decisione su quale metodo utilizzare dovrebbe essere guidata sia dagli obiettivi dello studio che dalla qualità dei dati raccolti.

## **3.4 Problemi tipici durante gli esperimenti**

Dunn e colleghi (2023) hanno analizzato uno degli aspetti chiave per condurre al meglio i protocolli sperimentali con il tracciamento oculare. Gli autori hanno evidenziato

che è importante dettagliare le specifiche tecniche della strumentazione per garantire ad altri ricercatori la replica degli studi futuri per comprendere meglio gli errori frequenti e le potenziali limitazioni degli strumenti utilizzati. La frequenza di campionamento, le restrizioni del movimento della testa e degli occhi sono aspetti cruciali da riportare perché influenzano direttamente la qualità e l'interpretazione dei dati raccolti (Ukwade & Bedell, 1992; Jayaramachandran et al., 2014).

Per esempio, una frequenza di campionamento più alta può catturare movimenti oculari più rapidi, ma può anche generare una maggiore quantità di dati, influenzando le informazioni ricavate dall'analisi dei dati.

Infatti molti ricercatori si imbattono in alcuni problemi tipici: il primo è ottenere un'immagine corretta dell'occhio. Se l'eye tracker VOG non riconosce l'occhio nell'immagine della telecamera, il tracciamento non è possibile. È quindi cruciale controllare l'immagine per assicurarsi che tutte le caratteristiche necessarie dell'occhio siano visibili e che l'occhio non sia ostruito da montature degli occhiali o altri oggetti.

Un altro problema comune è quando gli occhi del partecipante sono fuori dal campo visivo della telecamera, il cosiddetto "track box". Questo problema può spesso essere risolto modificando la distanza tra lo schermo (e l'eye tracker) e il viso del partecipante. Non tutti gli eye tracker permettono di controllare l'immagine della telecamera, ma dovrebbero comunque fornire un feedback per informare se tutto è corretto. Per gli eye tracker montati sulla testa, la telecamera degli occhi deve essere regolata ogni volta che un partecipante lo indossa, assicurandosi che tutto l'occhio sia visibile dalla telecamera (Holmqvist et al., 2011).

Gli Eye tracker VOG tipicamente operano in luce a infrarossi vicini e non sono vulnerabili ai cambiamenti di luce visibile. Tuttavia, la luce solare contiene anche IR (Infrarossi), quindi è necessario fare attenzione quando si opera alla luce del sole, ad esempio in contesti di laboratorio si dovrebbero coprire le finestre per ridurre la quantità di luce solare. Allo stesso tempo, la luce artificiale moderna non emette frequenze IR, quindi è del tutto innocua e può essere tranquillamente trascurata. È importante ricordare che l'iride si allarga in ambienti bui, influenzando negativamente l'accuratezza dell'eye tracker, rendendo preferibile un laboratorio con accesso limitato alla luce solare e adeguatamente illuminato da luce elettrica (Carter & Luke, 2020).

Un'altra sfida è la capacità dell'eye tracker di trovare le caratteristiche dell'occhio, come il centro dell'iride e la posizione del glint. Gli occhiali e le lenti a contatto possono essere gestiti dagli eye tracker VOG, ma si deve tenere presente che l'accuratezza è tipicamente inferiore in queste condizioni. Un problema aggiuntivo con gli occhiali possono essere i riflessi. Inoltre, il mascara può creare problemi poiché i suoi pigmenti scuri possono confondere gli algoritmi dell'eye tracker, quindi è consigliabile chiedere ai partecipanti degli studi di non utilizzarlo prima degli esperimenti.

Infine, molti ricercatori hanno problemi con la calibrazione. Le tecniche di Eye Tracking non forniscono direttamente coordinate esatte dello sguardo, ma piuttosto generano un insieme di caratteristiche che devono essere mappate in un punto di fissazione specifico. Queste caratteristiche variano in base alla tecnica impiegata, come la tensione (EOG), l'intensità della luce (IROG), un vettore tra il centro della pupilla e il riflesso (VOG), o semplicemente l'immagine intera dell'occhio. Per calcolare correttamente il punto di fissazione, è necessaria una funzione che ricalcoli queste caratteristiche in coordinate (x, y). Tale funzione viene generalmente creata sulla base di una serie di esempi, ovvero caratteristiche acquisite per coordinate di fissazione note, raccolte durante il processo di calibrazione.

Durante la calibrazione, l'utente deve seguire con lo sguardo un oggetto in movimento sullo schermo. La posizione dell'oggetto cambia e l'utente deve seguire questo oggetto con gli occhi. L'eye tracker raccoglie un elenco di caratteristiche con posizioni di fissazione note e utilizza questa raccolta per costruire la funzione di calibrazione. Per creare un modello adeguato, è necessario raccogliere molti esempi da diverse posizioni sullo schermo. La maggior parte delle calibrazioni integrate degli Eye tracker utilizza da cinque a nove punti posizionati uniformemente sullo schermo (Harezlak et al., 2014).

La calibrazione dovrebbe essere eseguita prima di ogni esperimento. Sebbene ci siano evidenze che dimostrano come la calibrazione effettuata su un soggetto possa funzionare allo stesso modo su una seconda persona, è più sicuro ripetere la calibrazione prima di ogni tentativo, specialmente quando bisogna prediligere l'accuratezza della misurazione (Villanueva & Cabeza, 2008). Il processo di calibrazione, sebbene sembri un processo semplice per gli utenti, può risultare scomodo e innaturale, poiché molte persone non riescono a mantenere lo sguardo fisso su un punto per il tempo necessario ad acquisire i

dati necessari. Di conseguenza, in ogni esperimento di Eye tracking alcuni partecipanti devono essere esclusi a causa dell'impossibilità di calibrarli correttamente, a volte fino al dieci per cento dei partecipanti (Nagamatsu et al., 2009).

Un problema ulteriore con la calibrazione è che richiede una certa cooperazione dell'utente, il che spesso non è possibile, soprattutto con persone affette da disturbi mentali o bambini. Questo è il principale motivo per cui gli sviluppatori devono concentrare i propri sforzi sullo sviluppo di Eye tracker che non richiedono calibrazione. Tali dispositivi devono basarsi su alcune ipotesi riguardo alle dimensioni e alla forma dell'occhio e conoscere le esatte relazioni spaziali tra la telecamera dell'Eye tracker, gli occhi del soggetto e lo schermo. Tipicamente, questi Eye tracker utilizzano più di una telecamera e/o più di una fonte luminosa (Kasrowski et al., 2019). Le posizioni esatte di tutti gli elementi possono essere utilizzate come input in un modello 3D dell'occhio per calcolare la posizione precisa dello sguardo (Patrick & Anshel, 2018).

Un'altra strategia per evitare la calibrazione è l'introduzione della "calibrazione implicita". Questi metodi operano sulla base di ipotesi su ciò che potrebbe attrarre lo sguardo del soggetto. L'algoritmo conosce lo stimolo e cerca di indovinare dove l'utente sta guardando. Basandosi su queste previsioni, costruisce un modello di calibrazione (Kasrowski, & Ober, 2004). Il principale svantaggio della calibrazione implicita è che richiede molto più tempo per costruire un modello affidabile. Tuttavia, il suo principale vantaggio è che può essere eseguito senza la partecipazione consapevole dei soggetti.

## **CAPITOLO 4 LE NUOVE SFIDE NEL TRACCIAMENTO OCULARE**

### **4.1 Dal laboratorio alla Realtà Virtuale**

In un contesto scientifico, il tracciamento dello sguardo o "eye tracking" riveste un ruolo fondamentale nello studio dell'interazione tra percezione e azione, essenziale nella

scienza della visione. Il nostro sistema visivo, evolutosi per la rapida acquisizione e l'elaborazione delle informazioni visive funziona attraverso un processo di distribuzione dell'attenzione visiva, considerato un esempio eccellente di sensorialità attiva (Schroeder, 2010; Gehring, 2014). L'attività oculare, interconnessa con le azioni motorie, guida la nostra percezione durante comportamenti liberi (Johansson, 2001; Hayhoe, 2003).

I movimenti oculari, parte integrante del sistema visuomotorio, sono continuamente attivi durante la visione naturale. Tuttavia, molti studi sperimentali hanno trattato lo sguardo in modo riduzionista, separato dal contesto corporeo. Studi recenti hanno incorporato la natura incarnata del comportamento visuomotorio, come dimostrato nel gioco del biliardo, offrendo differenti pattern neurocomportamentali dell'apprendimento motorio (Haar & Faisal, 2020). Questo approccio è stato esteso alla realtà virtuale (Haar et al., 2021) e agli ambienti estremi (Breen et al., 2023).

Per comprendere l'attenzione in modo ecologicamente valido, è cruciale registrare lo sguardo in ambienti naturali (Foulsham, 2015). Ciò è stato storicamente difficile a causa di limitazioni tecniche, ma recenti avanzamenti nella tecnologia hanno reso possibile una vasta gamma di esperimenti dinamici in ambienti naturali. Nonostante gli studi classici basati su eye-tracker fissi a schermo siano ancora comuni nella ricerca, si è verificato un cambiamento verso un approccio più olistico ed ecologico valido, che incorpora segnali ambientali e mobilità libera (Pelz et al., 2000; Einhäuser, 2007; Land, & Tatler, 2009).

L'evoluzione tecnologica dei metodi di registrazione dello sguardo è stata significativa. Da pionieri come Buswell (1935) e Barlow (1952), fino al lavoro fondamentale di Yarbus (1967), la ricerca sulla visione ha studiato costantemente la relazione tra percezione attiva, attenzione e azione. Le prime tecniche di eye tracking come descritti in precedenza erano invasive e ingombranti. La videooculografia offrì un approccio meno invasivo e il dual-Purkinje eye-tracker segnò un punto di svolta, rimanendo non invasivo e permettendo registrazioni oculari precise (Crane & Steele, 1985).

Gli studi tradizionali hanno riconosciuto quattro principali tipi di movimenti oculari: saccadi, convergenza, inseguimento liscio e riflesso vestibolo-oculare, come evidenziato da Kowler (2011). Tuttavia, la raccolta di informazioni in contesti reali si discosta da questi modelli classici. Nei contesti naturali si osserva una combinazione più complessa

di questi movimenti oculari, che si intersecano in modi non lineari, come descritto da Goettker et al. (2020). Questa complessità riflette la natura dinamica e adattiva del sistema visivo umano in ambienti variegati e interattivi.

Con l'avvento di sistemi di video-oculografia (VOG) ergonomici montati sulla testa, si è potuto passare a configurazioni di registrazione meno invasive per studiare lo sguardo in ambienti naturali. Questi sistemi, prodotti da aziende come SMI, Pupil Labs e Tobii, utilizzano la luce infrarossa per tracciare l'occhio e calcolare la direzione dell'occhio e della testa (Guestrin, & Eizenman, 2006).

La maggior parte include telecamere “*Egovideo*” rivolte verso l'ambiente esterno, consentendo la registrazione simultanea della scena visiva osservata e una mappatura successiva della posizione dello sguardo sul video egocentrico. Tali sistemi hanno permesso di studiare gli effetti della salienza visiva nel comportamento naturale. Con l'avanzamento delle telecamere ad alta frequenza di fotogrammi e degli algoritmi di tracciamento degli oggetti, sono state sviluppate soluzioni innovative per il tracciamento dello sguardo 3D in movimento, che sfruttano sia la vergenza che sensori di telecamere RGB-D time-of-flight per comprendere meglio le fissazioni sugli oggetti a distanze maggiori (Abbott & Faisal, 2012; Schneider et al., 2009; Tang et al., 2017; Moghimi et al., 2014).

Tuttavia, i tracker (video-oculografici) montati sulla testa per la ricerca in movimento presentano limitazioni, come la possibilità di scivolamento della telecamera e conseguente diminuzione dell'accuratezza del tracciamento a causa del movimento della persona registrata (Niehorster et al., 2020). Inoltre, la luce infrarossa esterna, come il sole, può causare interferenze nel tracciamento della pupilla. Le procedure di calibrazione per questi dispositivi in ambienti naturali di solito comportano l'uso di marcatori in punti di riferimento ambientali (Sullivan et al., 2021). Le limitazioni della frequenza di registrazione e gli ostacoli causati dal posizionamento fisico della telecamera sul volto dell'utente rappresentano delle sfide nel tracciamento oculare. Queste possono essere mitigate attraverso l'uso di scenari ben progettati che riducono gli errori di tracciamento. La realtà virtuale (VR), in rapida ascesa nel mercato e nella ricerca, offre nuove possibilità in questo ambito. Clay e colleghi, nel loro lavoro del 2019, hanno esplorato come l'integrazione dell'eye tracking con la VR possa essere utilizzata per monitorare con

precisione il comportamento umano in ambienti semi-realistici. Il loro metodo impiega un sistema VR/ET integrato per calcolare accuratamente lo sguardo nel 3D, migliorando significativamente le potenzialità di questo approccio. L'integrazione dell'eye tracking con la realtà virtuale (VR) apre nuove possibilità per lo studio del comportamento visivo umano in ambienti immersivi e controllati. Tale approccio fornisce una visione più naturale e dettagliata rispetto ai metodi tradizionali, come evidenziato nello studio di Imaoka et al. (2020). Questa tecnologia avanzata non solo va a migliorare la comprensione del comportamento visivo e la progettazione di interfacce uomo-macchina, ma offre anche nuove prospettive per la diagnosi e il trattamento di disturbi neurodegenerativi. Il vantaggio della realtà virtuale in laboratorio permette di misurare simultaneamente variabili fisiologiche sul movimento umano senza dover spostare l'attrezzatura da nessun laboratorio. L'uso di un ambiente 3D completamente immersivo combina il controllo dell'eye tracking statico con la flessibilità di ambienti più naturalistici virtuali. Le tecniche di eye tracking integrate con la realtà virtuale (VR) mostrano una notevole versatilità ma possono evidenziare discrepanze tra i sistemi visivi e vestibolari. Un approccio efficace per affrontare questa sfida è consentire ai partecipanti di muoversi liberamente nello spazio VR. Questo richiede uno sviluppo avanzato di programmazione laboratoriale, come sottolineato da Peterson et al. (2018).

In sintesi, possiamo affermare che la registrazione dello sguardo è diventata un prezioso strumento nella scienza della visione e della percezione, evolvendosi considerevolmente con l'avanzamento tecnologico. Questi sviluppi hanno aperto nuove frontiere nella comprensione del comportamento umano e nell'interazione uomo-macchina, offrendo strumenti più intuitivi ed efficaci. Tuttavia, esistono ancora sfide da affrontare per ottimizzare l'accuratezza e l'affidabilità di queste tecniche in contesti dinamici e naturali. Questi progressi, pur entusiasmanti, richiedono un continuo perfezionamento per soddisfare pienamente le esigenze della ricerca e dell'applicazione pratica.

## **4.2 Il tracciamento oculare in ambienti naturali e dinamici**

Le registrazioni in ambienti naturali rivelano che la fovea limita le informazioni visive ad alta risoluzione a una piccola regione centrale della visione (1-2 gradi), influenzando

direttamente dove possiamo concentrare la nostra attenzione attiva (Hendrickson & Yuodelis, 1984). È emersa una distinzione significativa nella dinamica dell'attenzione visiva tra condizioni con testa fissa e movimento libero, notando differenze statisticamente significative sia nelle velocità di picco saccadiche sia nelle distribuzioni spaziali dei movimenti oculari (Brouwer et al., 2009). Anche l'effetto contestuale degli oggetti nell'ambiente è notevole, con distribuzioni di fissazioni significativamente diverse tra oggetti afferrati per spostarli e oggetti semplicemente toccati (Smeets et al., 1996). Nakashima et al. (2015) hanno registrato i movimenti della testa e i dati dello sguardo su uno schermo 2D, tentando di conciliare queste differenze attraverso una mappa di salienza integrata che combina mappe di salienza computazionale classiche con dati sulla direzione della testa, scoprendo che il bias della fissazione centrale persisteva nel loro compito con testa libera, sebbene fosse in gran parte spiegabile dal bias della direzione della testa.

La transizione da esperimenti di salienza visiva basati su scene statiche a esperimenti basati su ambienti dinamici richiede una revisione delle classificazioni esistenti del comportamento dello sguardo, tradizionalmente definite tramite esperimenti di visualizzazione con testa fissa, per incorporare indizi di movimento e oggetti nel mondo reale. Lavori recenti hanno iniziato ad affrontare la nozione di indizi semantici nella salienza come un fattore chiave nel guidare il comportamento dello sguardo nelle scene del mondo reale (Peacock et al., 2019). Questa comprensione ci ha portato a considerare i movimenti oculari non solo in termini di tipi di classificazione (fissazioni e saccadi) ma verso un comportamento più sfumato e complesso, che presenta combinazioni di saccadi e fissazioni con movimenti congiunti di occhi e testa, e oggetti esterni nel campo visivo.

### **4.3 I Nuovi Tracciatori Oculari Indossabili**

Nel campo dell'interazione uomo-computer (HCI), il tracciamento dello sguardo è fondamentale per comprendere l'attenzione e l'interesse umano. Il recente studio di Sj et al. (2024) introduce un innovativo framework di eye tracking, progettato per superare le limitazioni delle tecnologie esistenti. Un elemento chiave di questo framework è l'integrazione di meccanismi di compensazione per le diverse pose della testa durante il tracciamento oculare. Questo aspetto è essenziale per mantenere l'accuratezza del

tracciamento anche quando l'utente muove la testa. L'applicazione pratica del framework in analisi dello sguardo su pagine web e prodotti sugli scaffali in studi sul Neuromarketing ha fornito risultati intuitivi e allineati con le intuizioni umane, confermando la sua usabilità e affidabilità in scenari reali. La tecnologia dei tracciatori oculari indossabili ha guadagnato sempre più rilevanza. Questo interesse è iniziato con i lavori pionieristici di Land, Mennie e Rusted (1999), Ballard, Hayhoe e Pelz (1995) e Vickers (1996), che hanno aperto la strada a una vasta gamma di applicazioni pratiche. A differenza dei sistemi di tracciamento oculare stazionari, i tracciatori oculari indossabili offrono la libertà di muoversi e girare la testa in tutte le direzioni, rendendoli strumenti preziosi per lo studio del comportamento visivo umano in un'ampia varietà di attività quotidiane, come preparare un sandwich, giocare a squash, navigare tra la folla e persino in contesti di realtà virtuale e aumentata. Un recente studio ha esaminato la qualità dei dati di tracciamento oculare di sei tracciatori oculari indossabili in cinque diverse condizioni di movimento, inclusa la stazione eretta ripetuta (Niehorster et al., 2024). È stato scoperto che tutti i tracciatori erano in grado di registrare lo sguardo anche durante le attività più dinamiche, come saltare e saltellare. Tuttavia, l'accuratezza si è rivelata peggiore nella seconda prova di stazione eretta rispetto alla prima, con l'errore maggiore registrato a 5.8 gradi, anche se nella maggior parte delle registrazioni l'errore rimaneva al di sotto dei 3.0 gradi. Interessante notare che la maggior parte dei tracciatori non ha subito perdite di dati nelle prove più esigenti. Questi risultati suggeriscono che i tracciatori oculari indossabili sono diventati più robusti e resilienti rispetto alle aspettative basate su studi precedenti, come quello di Niehorster et al. (2020), i quali avevano dichiarato che dispositivi come Pupil-labs e SMI mostravano una maggiore deviazione, indicando una minore affidabilità, evidenziando problemi di slittamento in situazioni di movimento (Hooge et al., 2023). In un altro importante lavoro altri autori si sono concentrati sull'importante sfida di rilevare accuratamente la posizione della pupilla in situazioni reali. I ricercatori hanno esaminato sei metodi all'avanguardia per il rilevamento della pupilla, tra cui ElSe, ExCuSe e Pupil Labs, confrontando le prestazioni su un vasto set di dati (Fuhl et al 2016). Gli autori sottolineano come la comprensione dei processi sottostanti alla percezione visiva abbia attirato l'interesse in diversi campi di ricerca, che vanno dalla medicina alla psicologia e dalla pubblicità al controllo delle applicazioni. Lo sviluppo di eye tracker

montati sulla testa ha permesso di studiare la percezione visiva umana e l'allocazione dell'attenzione in ambienti naturali.

Sebbene il tracciamento degli occhi possa essere realizzato con successo in condizioni di laboratorio, molte ricerche riportano delle anomalie quando gli eye tracker vengono impiegati in ambienti naturali, come la guida, lo shopping o semplicemente camminando (Liu et al., 2002; Sippel, 2014; Sugano et al., 2015). Principali fonti di errore in tali contesti sono legati a un segnale della pupilla non robusto, a causa della rilevazione dell'immagine della pupilla non ottimale. Di conseguenza, i dati raccolti in questi studi spesso richiedono un laborioso e dispendioso tempo post-processamento manuale, rendendo impossibili le applicazioni in tempo reale sul monitoraggio della pupilla. Recenti progressi hanno portato a notevoli sviluppi in termini di rilevamento della pupilla in tempo reale. Thiago et al. (2018) hanno introdotto un metodo innovativo chiamato Pupil Reconstructor (PuRe) per il rilevamento della pupilla in scenari pervasivi. Utilizzando oltre 316000 immagini acquisite con quattro distinti dispositivi di eye tracking montati sulla testa, i risultati hanno dimostrato un miglioramento significativo nel tasso di rilevamento della pupilla rispetto agli algoritmi presenti, migliorando la precisione e la specificità del 25.05% e 10.94% rispettivamente. PuRe è stato confrontato con metodi di rilevamento della pupilla all'avanguardia in condizioni realistiche e sfidanti, dimostrando un tasso di rilevamento della pupilla superiore rispetto a tutti i concorrenti algoritmici. Il successo di queste nuove tecnologie supera le sfide comuni del rilevamento della pupilla in ambienti reali stabilendo un nuovo standard algoritmico e una base solida per il miglioramento delle future applicazioni.

## **4.5 L'algoritmo di tracciamento oculare Pupil Labs**

Fuhl et al. (2016) nel loro contributo si sono concentrati in particolare sulla tecnologia Pupil Labs. Il loro lavoro è stato cruciale per comprendere come avviene il processo di rilevamento della pupilla. Gli autori descrivono in modo dettagliato il processo matematico che porta al rilevamento della pupilla.

L'immagine dell'occhio dalla telecamera viene in un primo momento convertita in scala di grigi. Successivamente, un'area approssimativa della pupilla viene individuata

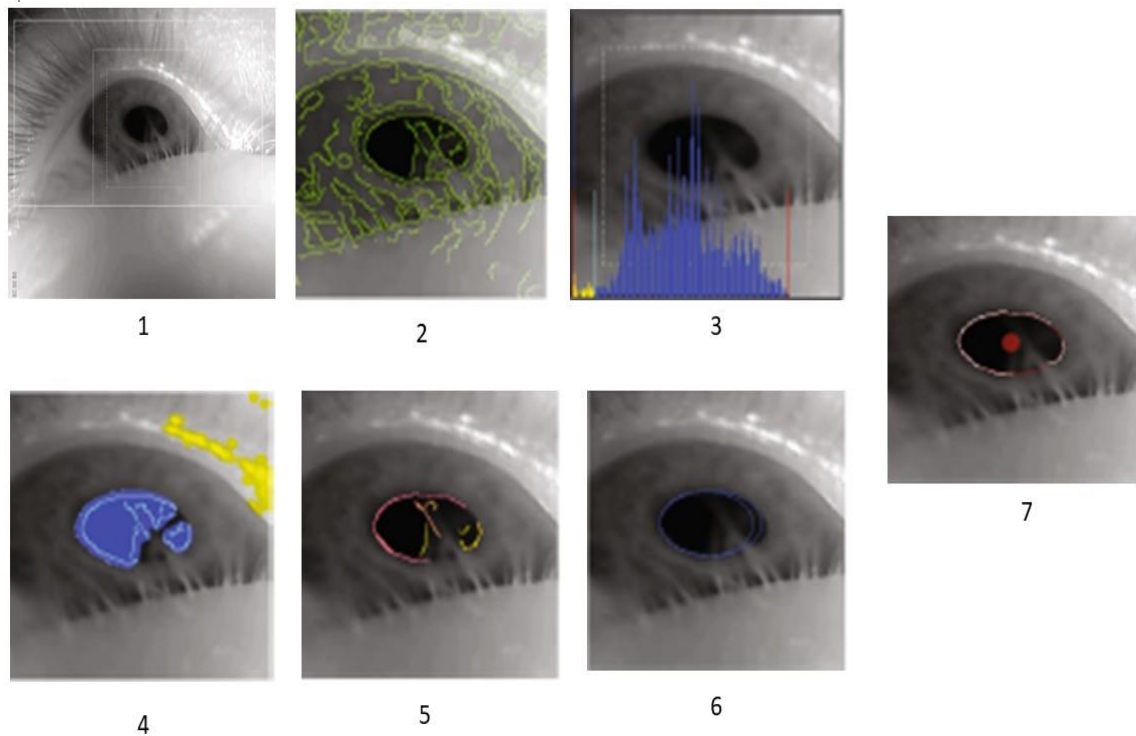
utilizzando la risposta all'interno dell'immagine, seguendo il metodo proposto da Świrski et al. (2012).

Nel passaggio successivo, i bordi dell'occhio vengono rilevati utilizzando l'algoritmo di Canny per individuare i contorni, i bordi vengono filtrati in base all'intensità dei pixel circostanti, grazie ad aree più scure (regione blu). Il livello di oscurità dell'immagine è indicato utilizzando un offset definito dall'utente, successivamente i bordi vengono filtrati ulteriormente per escludere quelli che potrebbero derivare da riflessi spettrali (regione gialla). I bordi rimanenti vengono quindi estratti in contorni tramite componenti connesse. Questi contorni vengono filtrati e suddivisi in sotto-contorni in base ai criteri di continuità della curvatura. In un ulteriore passaggio, vengono generate delle forme ellittiche candidate tramite un sottoinsieme dei contorni, cercando di ottenere la forma giusta tramite i minimi quadrati entro un intervallo definito. Infine, attraverso una ricerca avanzata, si cercano le forme che possano essere congruenti alle forme ellittiche candidate. Una volta elaborati i dati, i risultati vengono valutati in base all'adattamento ellittico dei bordi utilizzando l'approssimazione di Ramanujan, chiamata "confidenza". Se la confidenza supera una soglia prestabilita, l'algoritmo identifica questa ellisse corrispondente che va a definire il contorno della pupilla; altrimenti, segnala una non corrispondenza e non viene rilevata nessuna pupilla.

L'algoritmo esegue 6 fasi distinte e separate come definite in (*Fig. 1*)

- 1) Immagine dell'occhio convertita in scala di grigi, regione di interesse dell'utente (rettangolo bianco) e stima iniziale della regione della pupilla (quadrato bianco e linea tratteggiata).
- 2) Rilevamento dei bordi Canny (linee verdi).
- 3) Definizione della regione "scura" come offset dal picco più basso nell'istogramma dell'immagine dell'occhio.
- 4) Filtraggio dei bordi per escludere i riflessi spettrali (giallo) e non all'interno delle aree "scure" (blu).
- 5) I bordi rimanenti vengono estratti in contorni utilizzando le componenti connesse e suddivisi in sottocontorni in base a criteri di continuità della curvatura (linee multicolore).

- 6) Formazione delle ellissi pupillari candidate (blu) utilizzando un adattamento ellittico.
- 7) L'ellisse finale trovata attraverso una ricerca combinatoria aumentata (ellisse finale con il centro in rosso) – con i pixel del bordo di supporto disegnati in bianco



*Fig 1 (fasi procedurali dell’algoritmo di Pupil Labs per il rilevamento della pupilla):*

Questo approccio meticoloso e dettagliato garantisce un rilevamento preciso della pupilla, che è di fondamentale importanza per un tracciamento oculare affidabile in scenari dinamici non controllati.

L’algoritmo di Pupil Labs, incorporato nella piattaforma open source di Pupil Labs, offre soluzioni robuste e accurate per applicazioni in ambienti naturali. Chris Baumann e Kai Dierkes di Pupil Labs GmbH hanno condotto un’analisi approfondita sull’accuratezza del nuovo sistema di **Eye-Tracking “Neon”**, evidenziando i risultati sia in contesti di laboratorio che in scenari reali e variabili. Gli stessi autori hanno messo in luce l’importanza dei dispositivi montati sulla testa per comprendere la cognizione e la fisiologia umana in situazioni dinamiche. Il “Neon” si distingue per la sua capacità di

fornire un tracciamento affidabile in condizioni di illuminazione avverse, grazie all'utilizzo di reti neurali addestrate su dataset diversificati.

Nei risultati sperimentali ottenuti in laboratorio, utilizzando compiti che richiedevano ai partecipanti di concentrarsi su bersagli visivi disposti su due schermi a diverse distanze, coprendo un ampio campo visivo di 60° x 35°, è stata evidenziata un'alta precisione. In particolare, senza procedere alla calibrazione, l'accuratezza media per soggetto era di 2.1° a 0.4 metri e di 1.8° a 1.3 metri. L'accuratezza si è ulteriormente incrementata con l'aggiustamento dell'offset.

In contesti reali e variabili, il sistema ha mantenuto un'elevata precisione. Senza calibrazione, l'accuratezza registrata su tutto il campo visivo era di circa 1°, con punte di 1.6° in ambienti interni e 1.9° in ambienti esterni, migliorando significativamente con la correzione dell'offset, riducendo così la discrepanza tra le misurazioni in ambienti interni ed esterni.

Questo ha portato a chiarire come il Neon può offrire stime accurate dello sguardo senza una specifica calibrazione per l'utente, mostrando la sua efficacia e affidabilità per ricerche sia in ambienti controllati e sia in contesti dinamici e variabili. Fornendo un contributo significativo nel campo del tracciamento oculare.

## **CAPITOLO 5 PUPIL LABS NELLO SPORT: UNA REVISIONE NARRATIVA**

### **Introduzione**

Pupil Labs, fondata a Berlino nel 2014, ha rivoluzionato il campo del tracciamento oculare con soluzioni indossabili accessibili a una vasta platea, estendendosi oltre la comunità accademica. Attraverso l'integrazione di software open-source e hardware a basso costo, i fondatori hanno lanciato una piattaforma che fornisce strumenti concreti per la ricerca. Hanno anche creato forum per assistere giovani ricercatori, mostrando il

potenziale della loro tecnologia nel facilitare studi specifici (Picanço & Tonneau, 2018). Con una visione chiara, i fondatori hanno introdotto Pupil Core, un'innovativa suite software open-source accompagnata da un dispositivo di tracciamento oculare indossabile, affrontando sfide tecniche significative e proponendo soluzioni per future evoluzioni (Kassner, 2014). Questo prodotto ha rapidamente guadagnato l'attenzione internazionale, trasformando Pupil Labs in un leader del settore.

Nel 2019, Pupil Labs ha lanciato Pupil Invisible, un dispositivo simile a occhiali da sole, che sfrutta il deep learning per migliorare precisione ed efficacia nel tracciamento oculare. Questo avanzamento è stato supportato dal lavoro di ricercatori come Fuhl, Weber e Eivazi, che hanno contribuito allo sviluppo di software per analisi oculari avanzate, utilizzando algoritmi di ottimizzazione e reti neurali (Fuhl et al., 2022).

La piattaforma Pupil Cloud rappresenta un'altra innovazione significativa, offrendo un'ampia gamma di algoritmi e infrastrutture per l'analisi del movimento oculare. Questo ha permesso a molti ricercatori di effettuare studi approfonditi, arricchendo notevolmente la comunità accademica. Tra il 2014 e il 2024, sono stati pubblicati oltre 574 articoli, con tematiche che spaziano dall'interazione uomo-macchina alla neuropsicologia, dimostrando l'ampio impatto di questa tecnologia.

Un'analisi dettagliata dei contributi scientifici, basata su una ricerca accurata attraverso diverse banche dati elettroniche, ha evidenziato l'impatto di Pupil Labs anche nel campo dello sport, identificando le principali aree tematiche esplorate grazie a questa tecnologia.

## **Metodologia di ricerca**

Dal 2014 al 2024 sono stati pubblicati un numero considerevole di studi, da un'attenta ricerca della letteratura sono stati individuati oltre 574 articoli di cui 525 pubblicati con l'ausilio dell'Eye tracker CORE e 50 con l'eye tracker INVISIBLE, tra i vari studi condotti sono emerse diverse aree tematiche: *“l'interazione uomo computer, Psicologia cognitiva, Psicologia applicata, Psicologia sociale, Psicologia dello sviluppo, Neuroscienze e neuropsicologia, Clinica, Robotica, Controllo motorio, Visione computerizzata, Stima dello sguardo, Intelligenza artificiale, Apprendimento automatico,*

*Audiologia, Oftalmologia, Architettura e design, Psicofisica, Psicolinguistica, Oculomotricità, Lettura e Neuromarketing*". Da un'attenta e scrupolosa indagine effettuata sui diversi motori di ricerca scientifica è emerso che sono risultate diverse pubblicazioni in ambito sportivo. Dall'estrazione bibliografica di quattro banche dati elettroniche: PubMed, Scopus, Science Direct e Web of Science, sono stati selezionati solo gli studi pubblicati tra gennaio 2014 e Ottobre 2023. Per condurre una ricerca ordinata e specifica per area di interesse è stata creata una stringa di ricerca tramite operatori booleani "AND" e "OR" con la seguente serie: "*Eye Tracking AND sport OR atleta OR performance*" e "*Pupil Labs AND sport OR atleta OR performance*" e "*Pupil Core AND sport OR atleta OR performance*" e "*Pupil Invisible AND sport OR atleta OR performance*". Tutti gli studi sono stati filtrati in base e al tipo di articolo, portando ad individuare un totale di 13 articoli, 10 dedicati al Core e 3 sull'invisible e 0 sul Pupil Neon. La mancanza di articoli sul Pupil Neon è da attribuire al suo recente lancio.

La strategia di ricerca adottata ha permesso di portare alla luce un significativo numero di articoli che riflettono i progressi scientifici sul campo del tracciamento oculare con la tecnologia prodotta dalla azienda Tedesca nello sport. Questi articoli sono stati sottoposti a un processo di verifica in più fasi, che ha permesso di rimuovere i duplicati e gli articoli con la tecnologia non correlata. successivamente, attraverso lo screening dei titoli e degli abstract trovati, sono state escluse le pubblicazioni non attinenti allo sport includendo soltanto gli studi che hanno utilizzato il *Pupil Core* e il *Pupil Invisible*. Per questa revisione è stato scelto un approccio narrativo con l'obiettivo di estrapolare in modo logico e deduttivo le conclusioni dalle ipotesi di ricerca condotte e comprendere il suo reale utilizzo visto il numero ridotto di articoli pubblicati sull'argomento.

I risultati della ricerca sono stati analizzati e riassunti sistematicamente riportando scopo, metodologia, risultati e conclusioni di ogni studio individuato insieme al tipo di campione, sport praticato e parametro oculare utilizzato nella tabella 1.

## **Caratteristiche degli studi**

La ricerca ha messo in luce una notevole eterogeneità nelle discipline sportive esaminate attraverso l'utilizzo degli Eye tracker di Pupil Labs, nel 2023 un solo studio ha visto l'utilizzo del Pupil Core e in questo caso la disciplina esaminata è stato il canottaggio

(Herrebrøden et al., 2023), altri contributi nello stesso anno sono riconducibili al Pupil Invisible e nello specifico riguardano le seguenti discipline: scherma (Bagot et al., 2023), arbitri di calcio (van Biemen et al., 2023) e Ginnastica Artistica (Charbonneau et al., 2023). Tutti gli altri contributi sono riconducibili al dispositivo “Core” e riguardano Judo (Krabben et al., 2022), Dart throwing (Asadi et al., 2022), Badminton (Loiseau-Taupin et al., 2021), Motorsport Formula 4 (Nishizono et al., 2021), Arbitraggio nel basket (Fasold et al., 2021), hockey su prato (Klatt et al., 2021), Tiro a volo (Micheli et al., 2020), Baseball (Kishita et al., 2020), Basket (Klostermann, 2019)

Gli studi analizzati, pur essendo incentrati su discipline sportive diverse, condividono un obiettivo comune: comprendere in che modo il comportamento visivo e gli aspetti cognitivi influenzino le performance atletiche. Attraverso l'utilizzo dell'eye tracking, ogni ricerca ha adottato metodologie diverse per esplorare questa relazione, mantenendo lo scopo che contraddistingue gli studi in relazione alle discipline sportive di interesse.

Esistono significative differenze di indagine tra i diversi articoli analizzati, vista l'ampia gamma di applicazioni dell'eye tracking nello sport e le specifiche esigenze di ciascuna disciplina sportiva. Queste differenze possono essere ricondotte principalmente a tre aspetti principali: 1) Obiettivo della Ricerca: Gli scopi degli studi condotti variano notevolmente e passano da indagini sull'impatto dello sforzo mentale, dell'attenzione e del carico cognitivo, fino allo studio del comportamento visivo e della sincronizzazione dei movimenti in relazione alla fatica, alla concentrazione e alla decisione strategica. Mentre alcuni studi si concentrano sul miglioramento delle prestazioni atletiche attraverso l'analisi delle strategie visive, altri esaminano come i fattori psicofisiologici influenzano il comportamento visivo e decisionale.

2) Discipline Sportive: La varietà delle discipline sportive esaminate dal canottaggio al judo, dal dart throwing al motorsport, dall'hockey su prato alla scherma (ecc...) dimostra l'eccellenza dell'eye tracking come strumento di ricerca. Ogni sport presenta sfide uniche in termini di movimenti, decisioni e strategie, richiedendo approcci metodologici personalizzati per catturare i dati visivi pertinenti alla specifica disciplina sportiva.

3) Metodologie dello Studio: Le metodologie impiegate nei vari studi differiscono in termini di configurazione dell'eye tracker (da dispositivi mobili a sistemi ad alta

frequenza), design sperimentale (da analisi in laboratorio a studi sul campo) e parametri oculari misurati (come direzione dello sguardo, durata e numero di fissazioni, sincronizzazione del battito delle palpebre). Queste differenze metodologiche sono adattate per affrontare l'obiettivo specifico di ciascuno studio, evidenziando come l'eye tracking possa essere personalizzato per soddisfare le esigenze di ricerca in diversi contesti sportivi, con un campione che varia da studio a studio e che coinvolge atleti di élite, professionisti o partecipanti amatoriali. La sua selezione è estremamente correlata allo scopo specifico della ricerca e alla necessità di esaminare comportamenti in contesti diversi e in situazioni di allenamento o competizione.

le differenze tra gli articoli in termini di disciplina sportiva, obiettivi di ricerca, metodologie adottate, e partecipanti studiati, evidenziano la complessità e la ricchezza dell'approccio multidisciplinare nell'uso dell'eye tracking nello sport. Questa varietà contribuisce a una comprensione più profonda e sfaccettata di come i fattori visivi e cognitivi influenzino le prestazioni atletiche attraverso sport e contesti diversi.

## **Risultati degli studi**

Dall'analisi emerge chiaramente come l'eye tracking sta diventando uno strumento indispensabile nello studio della performance sportiva, offrendo approfondimenti su come la visione, l'attenzione, la cognizione e la fatica influenzino le prestazioni atletiche. La varietà degli approcci metodologici e degli scopi di ricerca riflette l'ampio spettro di applicazioni possibili, evidenziando il suo reale potenziale nel migliorare sia le strategie di allenamento che le prestazioni competitive degli atleti. Per quanto riguarda il contesto sperimentale, si può notare una forte tendenza a garantire la validità ecologica dei protocolli sperimentali; infatti, la maggior parte degli studi sono stati acquisiti in contesti ecologici, il che significa che lo scenario è stato presentato al partecipante da una prospettiva in prima persona, come riscontrato dalla revisione di Kredel et al. (2023).

### *Focalizzazione e Decision Making*

La versatilità degli studi individuati ha consentito di approfondire molteplici campi o aree di interesse, tra cui l'analisi del Decision Making. Quest'ultimo è stato descritto in

psicologia come un intricato insieme di processi valutativi e inferenziali che influenzano il processo decisionale (Newell et al., 2022). In questo contesto, il Decision Making emerge come un processo intermedio tra la percezione e l'esecuzione, richiedendo un'armoniosa integrazione tra le informazioni sensoriali e le conoscenze pregresse. Nello scenario sportivo, il successo non deriva solo dalla maestria nel controllo del movimento, ma anche dall'efficace capacità di prendere decisioni rapide e mirate in risposta agli stimoli visivi colti durante la performance (Williams & Jackson, 2019).

Nelle arti marziali e nei combattimenti, il processo decisionale e la capacità di selezionare le informazioni visive pertinenti rivestono un ruolo cruciale per il successo dell'atleta. Nel judo, durante la fase di lotta per ottenere la presa, è essenziale concentrarsi sulle mani dell'avversario (Piras et al., 2014). Limitare il campo visivo potrebbe compromettere significativamente le prestazioni dell'atleta, poiché influisce direttamente sulla capacità di percepire e rispondere agli stimoli dell'avversario (De Quel & Bennett, 2019). Questo fenomeno, volto a individuare la dimensione visiva ottimale per competere in modo efficace, è stato studiato da Krabben nel 2022, il quale ha esplorato l'importanza del campo visivo nel combattimento di presa nel judo. Gli autori hanno osservato come gli atleti utilizzino il campo visivo periferico per monitorare le mani dell'avversario, determinando che un campo visivo di almeno 30-40 gradi di raggio è necessario per tenere sotto controllo entrambe le mani dell'avversario la maggior parte del tempo. Questa scoperta suggerisce implicazioni significative per l'addestramento nel judo, nonché per i criteri di classificazione degli atleti con disabilità visive nei giochi paralimpici, indicando che una minore severità dell'impairment visivo dovrebbe essere richiesta per competere in modo efficace. La strategia di ancoraggio dello sguardo al petto dell'avversario, utilizzata dagli atleti, evidenzia l'importanza della visione periferica nel raccogliere informazioni cruciali in situazioni dinamiche, sottolineando il ruolo del campo visivo nel processo decisionale sportivo e nella prestazione atletica (Krabben et al., 2022).

Questi atleti si confrontano a distanza ravvicinata e richiedono abilità percettive superiori per adattarsi agli attacchi degli avversari (Ripoll et al., 1995). Per anticipare gli attacchi, reagire e rispondere con prontezza e precisione, i combattenti devono estrarre informazioni utili da una vasta quantità di dati dinamici sulla competizione, che possono includere movimenti, postura, distanza dall'avversario e stato dell'incontro. Queste

informazioni possono essere identificate ed elaborate attraverso l'attività visiva, consentendo agli atleti di prevedere i comportamenti degli avversari e di prendere decisioni più adeguate a vincere l'incontro. Un esempio è fornito dalla scherma, dove un'azione media per segnare un punto dura 5 secondi nella sciabola e 15 secondi nella spada (Roi & Bianchedi, 2008). Per questi atleti, il modo in cui percepiscono le informazioni dall'ambiente ha un impatto cruciale sull'efficacia delle azioni tecniche e tattiche. La ricerca condotta da Pierre Bagot et al. (2023) si immerge nell'analisi delle strategie di ricerca visiva degli schermidori d'élite, indagando come la visualizzazione varia in base all'arma utilizzata e influisce sul risultato delle competizioni. Lo studio si distingue per il suo approccio ecologico, cercando di replicare le condizioni reali di gara per catturare l'attività visiva degli atleti durante le simulazioni di competizione. I risultati rivelano che, a differenza di precedenti ricerche, non sono state identificate differenze significative nell'attività visiva tra i punti vinti e quelli persi, suggerendo che la strategia visiva potrebbe non essere direttamente correlata al successo in gara. Tuttavia, è stato osservato che gli schermidori tendono a concentrare il loro sguardo su determinate aree di interesse (AOI) in base all'arma utilizzata, evidenziando come la percezione visiva sia fondamentale nella scherma per anticipare e reagire alle mosse dell'avversario. Questo studio apre nuove prospettive sulla comprensione del decision-making nello sport, sottolineando l'importanza delle abilità percettivo-cognitive e come queste possano essere influenzate dalle condizioni di gara.

La capacità di osservare e interpretare rapidamente le azioni degli avversari è cruciale per il successo. Il focus del lavoro di ricerca è sul come gli atleti utilizzino le informazioni visive per fare scelte strategiche in tempo reale, suggerendo che una comprensione di questi processi possa contribuire significativamente a migliorare la prestazione sportiva sul campo. Lo studio di Stefanie Klatt et al. (2021) si inserisce in un ambito di ricerca che mira a decifrare i complessi meccanismi cognitivi e percettivi alla base del successo atletico, evidenziando l'interazione tra percezione visiva, decisioni tattiche e performance fisica. Gli autori hanno esplorato come il comportamento dello sguardo influenzi le decisioni strategiche in situazioni di gioco critiche, come i penalty corner nell'hockey su prato, sottolineando l'importanza dell'adattabilità e della percezione rapida nel successo atletico. Attraverso la conduzione di due studi, gli autori hanno dimostrato che i giocatori

di hockey esperti possono beneficiare di strategie di sguardo mirate per migliorare la qualità delle loro decisioni. In particolare, lo studio ha rivelato che la capacità di reagire al comportamento dei difensori, adattando diverse strategie di gioco, porta a un miglioramento sull'efficacia dei penalty corner. Tuttavia, questa abilità di adattamento richiede un allenamento specifico per affinare sia la percezione visiva che le decisioni tattiche. Il lavoro evidenzia un campo ancora poco esplorato nella ricerca sportiva, soprattutto nell'allenamento specifico sul comportamento dello sguardo.

La ricerca della letteratura ha messo in evidenza l'importanza di allenare non solo le abilità fisiche ma anche quelle percettive e decisionali, sottolineando come l'allenamento dello sguardo possa migliorare le prestazioni atletiche. L'approccio multidisciplinare alla preparazione degli atleti apre nuove prospettive per migliorare le capacità decisionali nello sport. Ad esempio, Micheli et al. (2020) hanno condotto uno studio sull'utilizzo del comportamento visivo per monitorare lo sguardo durante il tiro al piattello. Questo studio ha gettato le basi per una migliore comprensione di come le caratteristiche oculari possano influenzare le prestazioni atletiche. Hanno scoperto che abilità come il "quiet-eye" (la capacità di fissare il bersaglio per un periodo di tempo), il numero e la durata delle saccadi, insieme al tracciamento efficace dello sguardo, sono fattori determinanti per il successo negli sport di precisione e le strategie visive predittive ricoprono un ruolo cruciale negli sport di tiro e di battuta. Alcuni studi sul baseball hanno evidenziato che i battitori seguono principalmente la palla con la testa piuttosto che con i movimenti degli occhi mentre affrontano una palla in arrivo. Questa preferenza per la rotazione della testa ci suggerisce che tale movimento possa costituire un elemento fondamentale nella strategia visiva adottata dai battitori.

Al contrario, nel cricket, dove i battitori colpiscono la palla dopo che ha rimbalzato a terra, il loro sguardo rimane focalizzato sulla palla nella fovea per un certo periodo, prima di eseguire una saccade predittiva verso l'area in cui prevedono che la palla rimbalzerà (Mann et al., 2013). Il fenomeno noto come saccade predittiva si osserva anche in altri sport come tennis, tennis da tavolo e squash (Mann et al 2019). La sua principale funzione è facilitare il tracciamento della palla dopo il rimbalzo, consentendo ai giocatori di concentrarsi sulla posizione prevista del suo prossimo movimento.

In uno studio condotto da Kishita, Ueda e Kashino (2020), gli autori hanno esplorato le strategie visive e di movimento della testa dei battitori di baseball di élite durante la battuta, evidenziando come tali atleti prevedano la traiettoria della palla combinando movimenti oculari e rotazioni della testa. L'attenzione sulle saccadi predittive ha rivelato che i battitori di successo iniziano questi movimenti più tardi rispetto ai loro colleghi, suggerendo l'utilizzo di una strategia ottimale per massimizzare l'acquisizione di informazioni visive prima dell'impatto.

Questi risultati mettono in luce l'importanza della coordinazione oculo-manuale e della precisione nei tempi dei movimenti oculari nel contesto del baseball di alto livello, offrendo nuove prospettive sulle differenze di prestazione tra i battitori professionisti. Questo processo di ottimizzazione del gesto atletico fornisce informazioni cruciali direttamente correlate alle prestazioni sportive, evidenziando come tali scoperte possano essere applicate in molte altre discipline sportive. In contesti caratterizzati dalla necessità di elaborare rapidamente le informazioni visive e prendere decisioni in frazioni di secondo, queste competenze possono fare la differenza tra la vittoria e la sconfitta.

### *Gestione della fatica*

Quando si tratta di valutare l'attività sportiva, la fatica è uno degli elementi più studiati in letteratura. Tradizionalmente, la psicologia cognitiva ha dato maggior rilievo all'attenzione selettiva rispetto agli aspetti intensivi come lo sforzo mentale. Questo approccio ha portato alla scoperta che gli atleti d'élite spesso operano con il minimo pensiero cosciente, facendo affidamento sull'automaticità durante la competizione (Breivik, 2013). Tuttavia, ciò non implica necessariamente che gli atleti eliminino completamente lo sforzo mentale; piuttosto, sviluppano strategie per gestirlo in modo efficiente e mirato (Birrer & Morgan 2010). Nonostante queste scoperte, le ricerche sugli atleti di alto livello sono ancora limitate, soprattutto quando si tratta di compiti sportivi fisicamente impegnativi (Swann et al., 2015). Gli studi esistenti spesso mancano di validità ecologica e si concentrano su compiti con minori richieste fisiche. Ciò suggerisce che ci siano ancora molte sfide e direzioni future nella comprensione completa della gestione della fatica mentale tra gli sportivi.

L'uso della pupillometria e di altre tecniche di monitoraggio cognitivo possono fornire preziosi spunti di ricerca, come dimostrato da Henrik Herrebrøden et al. (2023). In questa ricerca, è stato investigato il concetto di fatica mentale negli atleti, evidenziando come essa possa influenzare le prestazioni sportive tanto quanto la fatica fisica. Gli autori hanno analizzato l'impegno cognitivo in canottieri d'élite e non, utilizzando metodologie come l'eye tracking con il Pupil Core per misurare il tasso di Blinks (ammiccamenti delle palpebre) e la dimensione della pupilla. Attraverso queste analisi, hanno esplorato come tali indicatori possano riflettere l'intensità dello sforzo mentale durante la competizione. Inoltre, gli autori hanno evidenziato un maggiore impegno mentale negli atleti con maggior esperienza, sfidando l'idea che l'esperienza porti necessariamente a una diminuzione dello sforzo cognitivo durante la prestazione. Questo studio sottolinea l'importanza dell'addestramento cognitivo insieme a quello fisico per ottimizzare le prestazioni atletiche.

Nel frattempo, uno studio condotto da Loiseau-Taupin e colleghi nel 2021 si distingue per l'approccio innovativo nell'analisi del comportamento visivo e delle performance durante una partita di badminton in condizioni di fatica acuta. Utilizzando occhiali per il tracciamento oculare, gli autori hanno esaminato l'influenza della fatica sulla durata e sul numero delle fissazioni oculari, oltre alle performance degli atleti. Contrariamente alle aspettative iniziali, la fatica non ha significativamente ridotto la durata delle fissazioni, ma ha invece aumentato il loro numero su specifiche aree come il volano e le zone vuote dopo il colpo dell'avversario, suggerendo un comportamento visivo più disorganizzato. Inoltre, le prestazioni non sono state direttamente influenzate dalla fatica, indicando che i giocatori novizi possono adottare meccanismi compensativi per mantenere le loro performance. Questi risultati offrono nuove prospettive sull'analisi del comportamento visivo in contesti sportivi reali e sottolineano l'importanza di considerare la fatica fisica nell'allenamento e nella preparazione degli atleti. In un altro studio condotto nel 2022, Ayoub Asadi e colleghi hanno investigato l'impatto delle strategie di focalizzazione dell'attenzione sull'apprendimento di atleti alle prime armi nel lancio delle freccette. Utilizzando la tecnologia oggetto di indagine per monitorare il "quiet eye" e la dilatazione pupillare, gli autori hanno esplorato l'efficacia di diverse istruzioni sulle strategie nell'influenzare le performance. Contrariamente alle aspettative, non sono emersi

benefici significativi dall'adozione di tali strategie; tuttavia, è stato notato che un prolungato periodo di "quiet eye" era correlato a prestazioni superiori, mentre una maggiore costrizione pupillare durante questo periodo indicava un maggior sforzo cognitivo. Questi risultati sollevano importanti interrogativi sull'interazione tra strategie di focalizzazione dell'attenzione, durata del "quiet eye" e performance motorie, sottolineando la necessità di ulteriori studi per comprendere meglio queste relazioni e ottimizzarle per migliorare l'apprendimento e le prestazioni negli sport.

L'analisi della gestione della fatica mentale e fisica negli atleti rappresenta un campo di ricerca in continua evoluzione (Habay et al., 2021). Tradizionalmente si è posto maggiormente l'accento sull'attenzione selettiva rispetto allo sforzo mentale, studi recenti evidenziano l'importanza di considerare entrambi gli aspetti per comprendere appieno le dinamiche della performance sportiva (Pacherie & Mylopoulos 2021). Tecniche avanzate come la pupillometria offrono nuove prospettive per esplorare l'impegno cognitivo durante l'attività sportiva, come dimostrato dagli studi di Herrebrøden e colleghi. Inoltre, le ricerche condotte da Loiseau-Taupin e Asadi forniscono insight preziosi sull'influenza della fatica sulla performance e sull'efficacia delle strategie di focalizzazione dell'attenzione. Questi risultati sottolineano l'importanza di un approccio integrato che consideri sia gli aspetti fisici che cognitivi nell'allenamento e nella preparazione degli atleti, con l'obiettivo di ottimizzare le loro prestazioni e massimizzare il loro potenziale.

#### *Sincronizzazione e Coordinazione del movimento*

Lo studio sull'influenza reciproca tra percezione e azione ha sempre suscitato notevole interesse nel mondo sportivo. Mann, Williams, Ward e Janelle (2007), insieme a Gegenfurtner, Lehtinen e Säljö (2011), hanno evidenziato che gli atleti con un alto livello di esperienza dimostrano comportamenti visivi "ottimali", consentendo loro di percepire informazioni cruciali in sincronia con l'esecuzione delle azioni motorie. Come dimostrato negli studi condotti da Loiseau-Taupin e Ayoub Asadi, in discipline sportive che richiedono precisione nel lancio o nel colpire un bersaglio nello spazio, la durata della fissazione sul bersaglio da colpire gioca un ruolo significativo nella differenza tra esperienza motoria e prestazione. Secondo Vickers (1996), il QE (Quite Eye) serve a

impostare adeguatamente i parametri del movimento come la posizione e la distanza del bersaglio, la traiettoria del lancio e le forze ottimali necessarie durante l'azione (Vickers, 1996).

Altri studi hanno corroborato questa ipotesi, evidenziando un prolungamento del periodo di esecuzione del QE in correlazione con la complessità del compito, suggerendo un aumento del carico di elaborazione delle informazioni durante la fase preparatoria del movimento (Klostermann et al., 2013). Klostermann (2019) ha condotto uno studio nella pallacanestro, fornendo spunti significativi per comprendere la coordinazione visuo-motoria nell'ambito delle performance atletiche del tiro libero. L'autore ha esaminato il QE durante i tiri liberi e ha scoperto che la sua durata è più prolungata negli atleti esperti rispetto a quelli meno esperti, suggerendo un maggior controllo nell'inibire alternative soluzioni di movimento. Questo approccio metodologico, che correla la durata del QE con l'accuratezza del tiro, sottolinea l'importanza di una sincronizzazione visuo-motoria ottimale per ottenere risultati di alto livello nello sport (Klostermann, 2019).

Lo studio ha rivelato che la durata del QE rappresenta un fattore discriminante significativo tra atleti di diversi livelli. Inoltre, l'analisi comparativa tra la precisione del tiro e la durata del QE a varie distanze ha dimostrato che entrambe superavano le aspettative, confermando così l'importanza del tracciamento oculare e fornendo importanti insight sulle strategie cognitive che sottendono all'expertise atletica (Klostermann, 2019). Un recente studio ha approfondito le strategie visuomotorie di trampolinisti di élite e sub-élite tramite eye tracking, evidenziando differenze significative nella frequenza di fissazione dello sguardo tra i due gruppi, pur mantenendo una durata delle fissazioni simile. È stato introdotto il concetto di rilevamento del movimento proprio, una specifica strategia visiva sportiva che comporta la non rotazione degli occhi durante rapide rotazioni della testa, prevalentemente utilizzata durante la fase di torsione delle acrobazie. Questo approccio offre nuove prospettive sulle strategie cognitive, sottolineando l'importanza del tracciamento oculare e delle strategie visuomotorie nell'ottimizzazione delle performance sportive (Charbonneau et al., 2023).

Nell'ambito sportivo, l'analisi della sincronizzazione dell'ammicciamento durante le prestazioni di alto livello evidenzia l'importanza della concentrazione e della gestione dell'affaticamento visivo in discipline che richiedono una costante reattività, precisione e coordinazione (Johns et al., 2009). Ulteriori ricerche hanno riconosciuto l'ammicciamento e/o la sua soppressione come indicatori dell'attenzione visiva, sottolineando il suo ruolo cruciale nelle prestazioni sportive (Shultz et al., 2011; Hoppe et al., 2018; Ranti et al., 2020;).

Nishizono, Saijo e Kashino (2021) hanno investigato l'importanza della sincronizzazione degli ammiccamenti spontanei durante la guida di un'auto da corsa, evidenziando come questo parametro riflette lo stato di attenzione dei piloti e influenza le loro prestazioni. I risultati hanno mostrato che una maggiore sincronizzazione degli ammiccamenti, sia all'interno di singoli giri di un pilota che tra piloti diversi, sono correlati con prestazioni migliori, pur non riscontrando significative variazioni della loro frequenza. Questo suggerisce che la capacità di regolare la frequenza e la sincronizzazione degli ammiccamenti in momenti critici può essere un fattore chiave per il successo in sport di alta velocità come le corse di Formula (Nishizono et al., 2021).

L'interesse nel mondo sportivo per lo studio dell'influenza reciproca tra percezione e azione è crescente, poiché fornisce importanti spunti per comprendere e ottimizzare le prestazioni atletiche. Il ruolo cruciale della sincronizzazione visuo-motoria, evidenziato dalla durata del Quiet Eye (QE) e dalla gestione dell'ammicciamento, emerge come indicatore significativo di abilità e concentrazione nella sfera sportiva. L'analisi della durata del QE durante compiti motori precisi e la sincronizzazione dell'ammicciamento durante attività ad alta reattività sottolineano l'importanza della concentrazione e della gestione dell'attenzione visiva per ottenere risultati di alto livello. Inoltre, studi recenti come quello condotto da Nishizono, Saijo e Kashino (2021) evidenziano come la capacità di regolare la frequenza e la sincronizzazione degli ammiccamenti possa influenzare le prestazioni in contesti ad alta velocità, come le corse automobilistiche. Complessivamente, queste ricerche contribuiscono a delineare le strategie cognitive sottostanti all'expertise atletica e forniscono preziose intuizioni per l'ottimizzazione delle prestazioni sportive.

### *Innovazione Metodologica e Formazione*

Negli ultimi decenni, il progresso tecnologico nei sistemi di eye tracking mobili ha reso più accessibile la ricerca sul campo per l'analisi individuale dello sguardo (Kredel et al., 2017; Wan et al., 2019). Software per l'analisi automatica e sistematica dei dati sono stati recentemente sviluppati da diversi sviluppatori (Panetta et al., 2019, 2020). Tuttavia, un ostacolo per molti ricercatori riguarda l'analisi del tracciamento sincronizzato del comportamento visivo all'interno di squadre sportive, specialmente in situazioni dinamiche. Sebbene siano stati condotti numerosi studi sull'analisi individuale del comportamento visivo, i risultati non sono stati ancora pienamente trasferiti nei gruppi sportivi.

Neider et al. (2010) hanno evidenziato che diverse modalità di condivisione delle informazioni, come la comunicazione verbale e lo scambio di sguardi tramite fissazioni tra individui, possono influenzare le prestazioni in contesti dinamici. Gli autori hanno suggerito che sia le informazioni verbali che visive possono favorire il coordinamento interpersonale. Studi precedenti hanno dimostrato che nel contesto di compiti di ricerca percettiva, il coordinamento degli sguardi attraverso l'osservazione degli altri membri della squadra porta a prestazioni superiori rispetto alla ricerca visiva individuale (Brennan et al., 2008). Nonostante l'interesse nella ricerca su queste dinamiche, pochi contributi hanno effettivamente valutato l'applicabilità di tali concetti sul campo, soprattutto in termini di attenzione sociale (Risko et al., 2016). Forse causata dal fatto che l'osservazione contemporanea di più persone richiede un'impostazione sperimentale ben strutturata con grandi volumi di dati difficili da analizzare manualmente in situazioni dinamiche. Il principale divario di ricerca riguardante l'analisi del comportamento dello sguardo di due o più individui in un ambiente naturale, è legato alla mancanza di un metodo per analizzare tecnicamente gli sguardi di più persone in modo efficace.

Fasold, et al., nel (2021) hanno introdotto uno studio con l'eye tracker della Pupil labs per analizzare il comportamento visivo di un team di arbitri di basket. Il contributo ha evidenziato l'importanza della coordinazione visiva e cognitiva nel contesto squadra, dimostrando che la performance di un gruppo non si basa solo sulle abilità individuali ma sulle capacità visive coordinate tra colleghi. Utilizzando un software appositamente

progettato per gli scopi di ricerca, gli autori hanno potuto osservare e analizzare i comportamenti visivi simultanei di tre arbitri durante una partita di basket, offrendo spunti significativi sulla sincronizzazione delle loro attenzioni visive rispetto alle linee guida della FIBA. I risultati hanno indicato una base concreta per ulteriori ricerche sulla coordinazione visiva di gruppo in ambienti dinamici e hanno aperto nuove prospettive tecnologiche da applicare in ambienti naturali, con implicazioni significative sul miglioramento delle prestazioni di squadre arbitrali.

L'esperienza visiva gioca un ruolo cruciale nella performance degli arbitri e le opportunità di eseguire allenamenti sul campo per acquisire esperienza visiva in situazioni di gioco reali sono limitate. Di conseguenza, alcuni arbitri cercano di guadagnare esperienza visiva aggiuntiva attraverso situazioni simulate, inclusi gli allenamenti video. L'efficacia dell'allenamento simulato dipende tuttavia dal grado di rappresentatività dell'ambiente di allenamento rispetto a quello sperimentato in competizione. L'allenamento ideale per gli arbitri dovrebbe essere godibile e includere un design di allenamento rappresentativo. Gli strumenti esistenti per l'allenamento del comportamento visivo negli arbitri fino ad ora sono stati sviluppati utilizzando filmati video, che presentano limitazioni decisionali significative. Negli ultimi anni, la realtà virtuale (VR) è emersa come una tecnica che potrebbe superare queste limitazioni. La VR offre un'esperienza immersiva che può migliorare la rappresentatività dell'esperienza di allenamento. Tuttavia, la promessa della VR come metodo di allenamento per gli ufficiali gara rimane in gran parte non testata, in particolare per quanto riguarda il modo in cui gli arbitri esplorano visivamente le informazioni all'interno dell'ambiente VR. Recentemente Tammie van Biemen, et al., nel (2023) hanno esplorato l'efficacia della realtà virtuale (VR) rispetto ai metodi tradizionali basati su video. Nello studio hanno coinvolto arbitri sub-elite in tre diverse modalità di allenamento: osservazione video, esperienza in VR e situazioni di gioco reale sul campo. L'obiettivo era valutare come questi metodi influenzassero le decisioni e i comportamenti visivi degli arbitri. Attraverso l'uso di eye-tracking della Pupil Labs, hanno misurato le differenze nelle performance decisionali e nelle strategie visive dei tre scenari, per determinare quale ambiente offrisse l'allenamento più efficace e rappresentativo. I risultati hanno evidenziato sempre più

l'importanza di sviluppare metodi di addestramento che incorporino tecnologie avanzate per offrire esperienze più immersive e rappresentative.

L'innovazione metodologica nel campo dell'analisi del comportamento visivo nei contesti di gruppo, come dimostrato dagli studi di Fasold et al. (2021) e van Biemen et al. (2023), sta aprendo nuove frontiere nell'ambito della formazione e dell'ottimizzazione delle prestazioni degli arbitri e, potenzialmente, di altri professionisti coinvolti in attività di coordinamento visivo e cognitivo. L'integrazione di tecnologie avanzate, come l'eye tracking e la realtà virtuale, offre un approccio più efficace e rappresentativo nell'allenamento, consentendo agli individui di acquisire esperienza visiva in contesti simulati più realistici e immersivi. Questi risultati non solo hanno implicazioni significative per il miglioramento delle performance degli arbitri sportivi, ma anche per lo sviluppo di metodologie di formazione più efficaci in una varietà di settori che richiedono coordinazione visiva e cognitiva in contesti di gruppo. In futuro, continuare a investire nella ricerca e nello sviluppo di queste tecnologie potrebbe portare a progressi significativi nel campo della formazione.

## **Discussione**

L'impiego dell'eye tracking nello sport, come dimostrato dalla ricerca degli ultimi dieci anni, ha rivoluzionato la nostra comprensione sulle dinamiche visive sul campo. Questa tecnologia non solo ha permesso di scrutare i processi cognitivi e percettivi degli atleti in azione ma ha anche offerto strumenti per affinare le tecniche di allenamento e migliorare le performance in una vasta gamma di discipline sportive. Gli studi analizzati rivelano come l'integrazione di approcci multidisciplinari, che combinano conoscenze della psicologia cognitiva, delle neuroscienze e della tecnologia, possa apportare contributi significativi alla scienza dello sport.

Uno degli aspetti più stimolanti evidenziati dalla letteratura è il ruolo del Decision Making e della focalizzazione visiva nelle prestazioni atletiche. La capacità di prendere decisioni rapide e accurate, spesso sotto pressione e in frazioni di secondo, si rivela essere un fattore discriminante tra atleti di diversi livelli. L'eye tracking ha permesso di

osservare come gli atleti elaborano le informazioni visive, dirigendo lo sguardo verso elementi chiave e filtrando le distrazioni, per ottimizzare il proprio processo decisionale. Questo aspetto, cruciale in sport come il judo o la scherma, dove la lettura anticipata delle mosse avversarie può determinare l'esito di un incontro, sottolinea l'importanza di allenare non solo il corpo ma anche la mente degli atleti.

L'analisi della gestione della fatica, sia fisica che mentale, ha aperto nuove prospettive sulle strategie di resistenza e recupero. Gli studi indicano che la fatica non solo incide sulla capacità motoria ma anche sulla funzione cognitiva, influenzando la concentrazione, la percezione e la reattività. L'eye tracking ha evidenziato come variazioni nella dilatazione pupillare e nella frequenza di ammiccamento possano servire da indicatori dello sforzo mentale, offrendo spunti per sviluppare allenamenti che bilancino adeguatamente intensità fisica e carico cognitivo.

La sincronizzazione e coordinazione del movimento rappresentano un altro campo di studio fondamentale. La capacità di coordinare la visione e l'azione in maniera efficace è essenziale in molti sport, dalla precisione nel tiro con l'arco alla tempistica nel colpire una palla da baseball. Qui, l'eye tracking ha fornito dati preziosi sulle strategie visive adottate dagli atleti, come la durata del quiet eye, che riflette la concentrazione visiva prima di eseguire un movimento. Questi dati hanno implicazioni dirette per l'allenamento, suggerendo che il miglioramento delle prestazioni può derivare non solo dalla pratica fisica ma anche dall'ottimizzazione delle strategie di focalizzazione visiva.

Infine, l'innovazione metodologica nell'uso dell'eye tracking e l'integrazione di nuove tecnologie come la realtà virtuale stanno trasformando il modo in cui gli atleti si allenano e preparano per la competizione. Questi strumenti offrono ambienti di allenamento simulati che possono replicare con precisione le condizioni di gara, permettendo agli atleti di esercitarsi in scenari altamente rappresentativi senza i rischi fisici o logistici associati alla pratica reale. In particolare, l'uso della VR per l'allenamento degli arbitri dimostra come queste tecnologie possano migliorare non solo le capacità tecniche ma anche quelle decisionali e cognitive, essenziali per la gestione delle dinamiche di gioco.

Complessivamente, l'eye tracking si afferma come uno strumento chiave per il futuro della ricerca e dell'allenamento nello sport. La sua capacità di fornire insight dettagliati e in tempo reale sulle dinamiche visive e cognitive offre una base solida per sviluppare

metodi di allenamento innovativi e personalizzati. Man mano che la tecnologia progredisce, si apre la strada a ulteriori studi che potrebbero esplorare in modo ancora più approfondito l'interazione tra percezione, cognizione e prestazione fisica, con l'obiettivo ultimo di ottimizzare le prestazioni sportive a tutti i livelli.

## **Conclusion**

Questo decennio di ricerca sulla tecnologia Eye tracking nello sport ha portato a importanti intuizioni sul ruolo del comportamento visivo e cognitivo nelle prestazioni atletiche. Gli studi analizzati hanno evidenziato come l'analisi approfondita del comportamento oculare possa fornire indicatori preziosi per la comprensione e il miglioramento delle strategie di allenamento e di gara. La variabilità delle discipline esaminate e delle tecniche utilizzate dimostra la versatilità dell'eye tracking come strumento di ricerca e formazione, capace di adattarsi alle esigenze specifiche di ciascuno sport.

Le innovazioni metodologiche e tecnologiche, come l'integrazione della realtà virtuale nell'allenamento, segnalano un futuro in cui la preparazione degli atleti può diventare sempre più mirata e immersiva, contribuendo significativamente al miglioramento delle prestazioni sportive. Questi progressi aprono la strada a nuove ricerche che potrebbero esplorare ulteriormente l'interazione tra percezione visiva, decision making, coordinazione motoria e fatica, con l'obiettivo finale di sviluppare metodi di allenamento e valutazione sempre più sofisticati ed efficaci.

In conclusione, l'eye tracking si conferma uno strumento indispensabile nella ricerca sportiva, con un potenziale ancora ampio da esplorare. La sua capacità di fornire insight dettagliati sul comportamento visivo e cognitivo degli atleti offre una base solida per ulteriori innovazioni nel campo dell'allenamento e della prestazione sportiva, promettendo miglioramenti significativi nelle strategie di preparazione degli atleti e nel loro successo competitivo.

Autori e anno	Campione dello studio	Disciplina Sportiva	Scopo della Ricerca	Metodologia dello Studio	Eye Tracker	Parametri Oculari Misurati	Risultati dello Studio	Conclusioni	Limiti dello Studio
Henrik Herrebrøden, et al., (2023)	Gruppo di élite: N=9 maschi del team nazionale norvegese di canottaggio delle Olimpiadi di Tokyo 2020. Gruppo non-élite: N= 9 maschi con esperienza variabile, che non hanno mai rappresentato la squadra nazionale norvegese	Canottaggio	Investigare lo sforzo mentale negli atleti di élite rispetto a un gruppo di non-élite	Studio in laboratorio con uso di eye-tracking per misurare i tassi di ammiccamento delle palpebre e dimensione pupillare	(SMI) Eye Tracking Glasses 2 Wireless; Pupil Core glasses	Blinks e dimensione pupillare	Gli atleti di élite mostrano uno sforzo mentale significativamente maggiore, come misurato dall'aumento della dimensione della pupilla rispetto ai non-élite	Gli atleti di élite non spendono meno sforzo cognitivo dei loro colleghi di livello inferiore; gli eye-tracker possono misurare lo sforzo mentale in compiti sportivi fisicamente impegnativi	Uso di diversi eye-tracker tra i partecipanti élite e non élite potrebbe confondere gli effetti dell'esperienza con i sistemi di tracciamento degli occhi. Test di riconvalida limitati per comparare le misurazioni della pupilla tra i due sistemi
Kai Krabben, et al., (2022)	8 judoka avanzati (cintura marrone o nera), 6 uomini e 2 donne, età media 27.3 anni, range 18–49 anni	Judo	Determinare la posizione delle informazioni visive nel campo visivo periferico durante un compito di combattimento sportivo	Uso di eye-tracker mobili e sistema di motion capture VICON per tracciare la posizione tridimensionale della testa e delle mani	Eye-tracker (Pupil Core)	Direzione dello sguardo, angoli tra le mani dell'avversario e il punto di ancoraggio dello sguardo sul petto dell'avversario	Relazione non lineare tra la dimensione del campo visivo (VF) e la visibilità delle mani; gli atleti necessitano di un VF di almeno 30–40 gradi di raggio per monitorare contemporaneamente entrambe le mani dell'avversario la maggior parte del tempo	Gli atleti indirizzano prevalentemente lo sguardo verso il petto dell'avversario; è necessario un VF di almeno 30–40 gradi di raggio per monitorare entrambe le mani dell'avversario con la visione periferica per la maggior parte del tempo	Non è stata valutata direttamente l'impatto della perdita di VF sulla performance, pertanto i risultati vanno interpretati con cautela; si basa su assunzioni riguardo alla perdita di VF circolare e simmetrica e non considera altri tipi o regioni di perdita di VF
Ayoub Asadi et al., (2022)	20 partecipanti (principianti nel lancio delle freccette), 18 inclusi nell'analisi finale, Mage = 23,89, SD = 3,79	Dart throwing	Investigare gli effetti dell'attenzione e del carico cognitivo sulla prestazione motoria, la durata dell'occhio tranquillo e la dilatazione pupillare.	Utilizzo di un paradigma di compito duale con il lancio delle freccette come compito primario e un compito secondario di rilevamento del tono per distinguere gli effetti del focus attentivo e del carico cognitivo sulla prestazione motoria e sulle misurazioni oculari.	Eye-tracker (Pupil Core)	Durata dell'occhio quieto (QED), diametro pupillare	Un carico cognitivo ridotto ha aumentato la precisione, mentre un carico alto ha aumentato il diametro pupillare. Un focus esterno ha portato alla maggiore precisione e durata dell'occhio tranquillo più lunga con un carico cognitivo alto.	L'aumento del diametro pupillare è correlato a un maggiore carico cognitivo ma non spiega il miglioramento della prestazione. Un focus esterno migliora la prestazione ma non è fortemente legato alla durata dell'occhio quieto.	Le dimensioni del campione e la specificità del compito possono influenzare la generalizzabilità dei risultati

Mildred Loiseau-Taupin, et al., (2021)	19 individui destri, età media = 26.0 ± 2.9 anni (donne 27.3 ± 2.0 anni)	Badminton	Valutare l'effetto della fatica fisica acuta sul comportamento visivo (gaze behavior) durante una partita di badminton e determinare la relazione tra fatica, performance e comportamento visivo.	Partecipanti hanno giocato due set di badminton: uno prima e uno dopo un compito affaticante. Gli occhiali per il tracciamento oculare hanno registrato il comportamento visivo.	Eye-tracker (Pupil Core)	Durata e numero di fissazioni per scambio, per nove aree di interesse.	La fatica ha indotto più fissazioni per scambio in due aree di interesse (volano e area vuota dopo il colpo dell'avversario) ma non ha impattato sulla performance in termini di punti vinti/perduti o colpi riusciti/non riusciti.	La fatica fisica acuta influisce sul comportamento visivo, aumentando il numero di fissazioni in specifiche aree di interesse. Tuttavia, non ha influenzato direttamente la performance in termini di risultati del gioco	Utilizzo di partecipanti non esperti, registrazione solo della visione foveale senza considerare la visione periferica o il focus di attenzione, e la difficoltà di misurare i saccadi in condizioni di gioco reali a causa dei bersagli in movimento e del movimento dei partecipanti.
Ryota Nishizono, et al., (2021)	Due piloti professionisti, rispettivamente di 32 e 23 anni	Motorsport categoria Formula	Investigare se la frequenza del battito palpebrale, la sincronizzazione dei battiti tra i giri di ciascun pilota e la sincronizzazione tra piloti erano correlate alla loro performance.	Analisi dei dati di battito palpebrale e comportamento dell'auto di due piloti professionisti in ambienti quasi di gara.	Eye-tracker (Pupil Core)	Frequenza e sincronizzazione del battito delle palpebre	Maggiore sincronizzazione nei giri di alta performance di ciascun pilota e tra piloti, ma nessun cambiamento significativo nella frequenza del battito palpebrale.	La sincronizzazione del battito palpebrale potrebbe riflettere i cambiamenti nel modo di performance durante la guida di auto da formula.	La dimensione del campione di soli due piloti professionisti limita la generalizzazione dei risultati. Inoltre, non è stato possibile esaminare se piloti normali mostrano schemi di battito simili quando guidano la stessa auto da formula.
Frowin Fasold, et al., (2021)	Squadra di esperti arbitri maschi, età 29 (esperienza livello esperto tedesco = 9 anni), 36 (esperienza = 10 anni), 44 (esperienza = 17 anni) tutti con esperienza a livello internazionale	Arbitraggio nel basket	Sviluppare un metodo per investigare il comportamento coordinato dello sguardo all'interno di un team arbitrale in un ambiente dinamico e reale	Utilizzo di tre sistemi di eye-tracking mobili Pupil Core, con le registrazioni degli spostamenti oculari effettuate a 200 Hz, abbinate ai video di scena catturati contemporaneamente a 30 Hz (30 fotogrammi al secondo)	Eye-tracker (Pupil Core)	Distribuzione e coordinamento dello sguardo dei tre arbitri nel loro campo visivo principale e tra di loro.	In circa il 47,07% delle scene analizzate, gli arbitri guardavano un punto nella loro area di osservazione primaria. Il team di arbitri ha seguito le linee guida della FIBA in circa la metà dei casi inclusi (situazioni di gioco). Interessante notare che nella maggior parte dei fotogrammi analizzati (>90%) hanno distribuito il loro sguardo su diversi AOI per coprire il maggior numero possibile di azioni di gioco	Il metodo sviluppato è innovativo nell'analisi del comportamento dello sguardo di gruppo in ambienti dinamici e ha mostrato che anche gli arbitri esperti possono deviare dalle linee guida stabilite.	L'analisi manuale dei dati è un processo che richiede tempo e suggerisce la necessità di sviluppare metodi di analisi automatica dei dati in futuro.

Stefanie Klatt, et al., (2021)	14 attaccanti (3 femmine, 11 maschi) con un'età media di 21.93 anni (SD = 3.95 anni), provenienti da vari livelli di esperienza nelle divisioni tedesche di hockey su prato e nelle squadre nazionali.	hockey su prato	Esplorare l'interazione tra comportamento dello sguardo e presa di decisioni durante i calci di rigore nel field hockey, con particolare attenzione alle strategie adottate in risposta al comportamento dei difensori.	Studio sperimentale con impiego di sistemi di eye-tracking mobili per registrare il comportamento dello sguardo dei giocatori durante l'esecuzione di calci di rigore. Lo studio è stato diviso in due parti: un questionario e un esperimento pratico.	Eye-tracker (Pupil Core).	Durata dello sguardo verso aree specifiche di interesse (pallone, stopper, area di goal, difensori) e la capacità di adattare il comportamento dello sguardo in base alle azioni dei difensori. Le misurazioni includevano la registrazione delle fissazioni dello sguardo a 200 Hz e la correlazione con un video della scena a 30 Hz.	I giocatori hanno mostrato differenze significative nel comportamento dello sguardo tra le strategie difensive, con una maggiore durata dello sguardo sull'area di goal quando adottavano strategie difensive dipendenti. I risultati suggeriscono che una strategia di gioco ottimale e l'adattamento del comportamento dello sguardo possono migliorare il successo nei calci di rigore.	L'adattamento delle strategie di gioco e del comportamento dello sguardo in base al comportamento dei difensori è cruciale per il successo nei calci di rigore nel field hockey. La ricerca sottolinea l'importanza di sviluppare e allenare specifiche strategie visive e decisionali.	Le limitazioni non sono state esplicitamente discusse, ma si può dedurre che le dimensioni del campione relativamente piccole e il contesto sperimentale specifico potrebbero influenzare la generalizzabilità dei risultati.
Massimiliano Micheli, et al., (2020)	6 atleti (dettagli sull'età e SD non forniti)	Tiro a volo, disciplina trap olimpico	Identificare le caratteristiche oculari più rilevanti per vedere il loro contributo nella prestazione atletica, con lo scopo di sviluppare soluzioni per monitorare le pupille degli atleti	Studio esplorativo che adatta un dispositivo per misurare gli spostamenti delle pupille in condizioni reali di tiro	Eye-tracker (Pupil Core)	Quiet-eye QE (tempo trascorso dal rilascio del bersaglio alla prima saccade rilevabile), tempo di saccade (durata del primo movimento rapido dal punto di fissazione al piattello), tempo di eye-tracking ETT (tempo trascorso per seguire il piattello fino al primo colpo)	I risultati ottenuti sono promettenti considerando la particolare configurazione dell'atleta e le condizioni non controllate caratterizzanti questa disciplina di tiro, ma sono necessari miglioramenti per aumentare l'accuratezza richiesta	Lo studio esplorativo ha tentato di evidenziare l'importanza degli aspetti oculari per una prestazione di tiro di successo. La normalizzazione di QE e ETT ha permesso di superare la dipendenza dei dati dagli sparatori e il di sbilanciamento dei dati pochi colpi mancati rispetto a quelli riusciti	limiti dello studio includono fattori esterni non controllati (luce ambientale), la postura adottata per il tiro che ha reso più difficile la registrazione delle pupille a causa dei movimenti della testa e dello slittamento, la distanza a cui sono state effettuate le stime, e le prestazioni dell'algoritmo del rilevatore di pupille

Yuki Kishita, et al., (2020)	6 giocatori di baseball professionisti della Nippon Professional Baseball (NPB); età media top players: 26,7 anni, farm team players: 24,7 anni	Baseball	Lo studio analizza i movimenti oculari e della testa dei battitori professionisti di baseball durante la battuta per comprendere le strategie visive impiegate in gioco reale. Si focalizza sulle saccadi predittive per anticipare la traiettoria della palla, con l'obiettivo di migliorare la precisione del colpo. Attraverso l'osservazione di sei giocatori in un contesto simulato, si cerca di identificare i pattern di movimento che influenzano la precisione di battuta, contribuendo a una migliore comprensione delle dinamiche visive e motorie nel baseball di élite.	Studio condotto con 6 giocatori professionisti di baseball che affrontano lanciatori professionali ritirati in condizioni simili a quelle di una partita. È stato utilizzato un eye-tracker indossabile e un sistema di motion capture ottico per registrare i movimenti oculari, della testa e della mazza	Eye-tracker (Pupil Core)	Direzione dello sguardo e della testa, errori nella localizzazione della palla, saccadi predittive	I battitori di baseball di élite dimostrano strategie visive superiori, con saccadi predittive avviate più tardi rispetto ai giocatori meno esperti. Questo consente una raccolta prolungata di informazioni visive, contribuendo a una maggiore precisione nel tracciare la palla e una minore tendenza agli errori di localizzazione. L'adozione di saccadi predittive ritardate suggerisce un'ottimizzazione della capacità di elaborazione visiva, migliorando complessivamente la precisione di battuta.	Le tecniche di spostamento dello sguardo e la coordinazione occhio-mano differiscono significativamente tra i battitori altamente qualificati, influenzando la precisione del battito. L'efficacia delle saccadi predittive sembra essere un fattore chiave nel successo dei battitori elite.	Il numero limitato di partecipanti rappresenta una limitazione, suggerendo la necessità di ulteriori ricerche per esplorare il significato funzionale delle saccadi predittive e il loro impatto sulla performance di battuta
Klostermann, A. (2019)	16 giocatori di basket (15 maschi, 1 femmina); età media = 23,3 anni, SD = 6,4 ann	Basket	Lo scopo dello studio è analizzare il fenomeno dell'occhio quieto (QE) nel basket, concentrandosi sull'ipotesi che la sua durata prolungata nei giocatori esperti indichi la soppressione di azioni alternative per privilegiare la migliore soluzione motoria. Si indaga se un QE più lungo corrisponda a migliori prestazioni nei tiri liberi, situazione in cui i giocatori spesso eccedono le aspettative. Questa ricerca potrebbe offrire intuizioni sulla relazione tra attenzione visiva e successo nelle abilità motorie specifiche.	Il campione dello studio è composto da 16 giocatori di basket (15 maschi e 1 femmina) che hanno effettuato tiri da varie distanze, inclusi i tiri liberi,	Eye-tracker (Pupil Core)	Durata del QE, posizione di fissazione	Lo studio evidenzia che l'accuratezza nei tiri diminuisce con l'aumentare della distanza, influenzando la maggior parte della varianza. Si osserva un'accuratezza reale al tiro libero superiore alle previsioni, indicando un effetto dell'abilità speciale. La durata dell'occhio quieto è più lunga del previsto, suggerendo un aumento delle richieste di inibizione, ma non è direttamente correlata all'accuratezza del tiro, suggerendo l'influenza di altri fattori sulla prestazione.	Le conclusioni indicano che l'effetto dell'abilità speciale nel tiro libero a basket è reale, con prestazioni superiori alle aspettative. La durata prolungata dell'occhio quieto conferma l'ipotesi di inibizione, suggerendo un ruolo cruciale nella soppressione di soluzioni motorie alternative in contesti altamente praticati. Tuttavia, l'assenza di una correlazione diretta tra durata del QE e precisione del tiro sottolinea la complessità del suo ruolo nella performance sportiva, evidenziando la necessità di ulteriori approfondimenti sulla sua influenza sull'esecuzione delle abilità motorie.	Limitato ai tiri liberi nel basket; la relazione tra precisione del tiro e durata del QE non era forte come previsto; gli effetti sulla performance di lunghe durate del QE non sono stati rivelati.

Pierre Bagot, et al., 2023	8 schermidori di élite (Épée: 2 maschi, 1 femmina; Fioretto: 1 maschio; Sabre: 2 maschi, 2 femmine), età 20-31 anni (Media = 25.88; DS = 3.87)	Scherma	Investigare le strategie di ricerca visiva degli schermidori di élite in condizioni simili alle competizioni ufficiali	gara simulata con eye tracker durante un assalto	Eye-tracker (Pupil invisible)	Durata della fissazione, conteggio delle fissazioni, tempo di permanenza	Principali aree di fissazione: torso superiore (fioretto e sciabola), torso inferiore (épée); nessun collegamento diretto tra attività visiva e prestazione	La strategia di ricerca visiva varia tra le armi; condizioni simili alla competizione possono disturbare l'attività visiva	Campione piccolo, variazione della distanza tra i combattenti durante la partita
Tammie van Biemen, et al., 2023	15 arbitri di calcio sub-élite (età media $\pm$ deviazione standard = 23.3 $\pm$ 3.3 anni)	arbitri di calcio	Esaminare il comportamento visivo degli arbitri di calcio in realtà virtuale rispetto al campo di gioco reale	Partecipanti completano compiti decisionali in condizioni sperimentali: sul campo, in VR e osservando video	SMI ETG 60 Hz (Pupil invisible) Tobii ETG 120 Hz HTC Vive (VR),	Tasso di ricerca, durata delle fissazioni, locazione delle fissazioni	Comportamento in VR indistinguibile da quello sul campo, differenze marcate rispetto all'osservazione di video	La VR fornisce una simulazione rappresentativa dell'ambiente sul campo, promettente per l'allenamento arbitrale	Campione limitato, impossibilità di replicare esattamente le situazioni di gioco reali in VR
Eve Charbonneau, et al., 2023	17 trampolinisti (8 elite: 4 maschi, 4 femmine, età media 22,3 $\pm$ 4,7 anni; 9 sub-élite: 3 maschi, 6 femmine, età media 15,3 $\pm$ 2,1 anni)	Ginnastica artistica Trampolino	Identificare le differenze nel comportamento dello sguardo tra trampolinisti elite e sub-élite durante l'esecuzione di quattro acrobazie di difficoltà crescente	Atleti dotati di unità di misura inerziali e di un eye-tracker indossabile hanno eseguito acrobazie su un trampolino da competizione. È stata condotta un'analisi della cinematica del corpo e dello sguardo.	Eye-tracker (Pupil invisible)	Durata e numero di fissazioni di tracciamento, durata e inizio del periodo di quiet eye, deviazioni integrate del collo e dell'occhio	Osservate differenze nelle strategie visuomotorie tra atleti elite e sub-élite, con gli atleti elite che fissano più frequentemente lo sguardo. Notevoli variabilità visuomotorie inter- e intra-individuo.	Lo studio offre spunti sul comportamento visuomotorio complesso dei trampolinisti in contesti ecologici, evidenziando l'importanza delle strategie di movimento del corpo e dello sguardo nella performance.	Campione ridotto, potenziali limitazioni nella replicazione delle condizioni di gara del mondo reale in un'impostazione sperimentale controllata.

*Tab. 1 (Studi in ambito sportivo dal 2014 al 2023 con tecnologia Eye tracking di Pupil Labs)*

# **CAPITOLO 6 LA VALUTAZIONE DEL CARICO COGNITIVO CON IL TRACCIAMENTO OCULARE**

## **6.1 Introduzione**

Nel principio dell'allenamento, sia esso fisico che mentale, emerge un elemento cruciale che spesso è lasciato al caso ma che sta guadagnando sempre più rilievo: la gestione del carico cognitivo. Ogni atleta o sportivo lo sperimenta ed è strettamente legata all'attività che viene svolta. Più impegnativa è la sfida, maggiore è il carico. Quando il carico cognitivo raggiunge l'apice, si manifesta lo stress mentale. Si è visto come un alto livello di stress porta a livelli bassi di performance insieme a una riduzione della concentrazione. Questa riduzione della concentrazione provoca un aumento della fatica in modo rapido e intenso.

Questa dinamica può essere paragonata allo sforzo fisico: così come l'attività fisica richiede un maggiore sforzo che si traduce in una performance inferiore, anche il carico cognitivo si traduce in stress e non in un risultato positivo.

La principale differenza tra i due tipi di sforzo sta nella complessità nel saperli misurare. È facile pensare che sollevare un peso eccessivo può essere troppo impegnativo, o che trasportare pesi medi durante un intero allenamento può causare problemi all'atleta nel corso del tempo. Al contrario risulta meno intuitivo comprendere gli effetti delle ripetizioni di un compito più o meno complesso sull'aspetto mentale. Il semplice atto di eseguire un'esercitazione mette sotto sforzo la mente; ovviamente, lo sforzo può risultare meno intenso in circostanze normali, ma la situazione può cambiare se la stessa attività viene ripetuta per l'intera durata dell'allenamento. I dispositivi di eye-tracking consentono di analizzare questo fenomeno. Esistono diverse metriche in grado di misurare indicatori del carico cognitivo, che tuttavia devono essere adattate allo sport in

questione. Risultati validi e affidabili possono essere ottenuti tramite esperimenti condotti con questo metodo.

Esistono poi diversi modi per misurare il carico cognitivo, e l'eye-tracking è stato sviluppato in maniera efficiente solamente negli ultimi anni. I dispositivi moderni hanno difatti l'importantissima caratteristica di essere indossabili, leggeri e wireless, permettendo misurazioni sul campo di parametri che vanno a rilevare pattern visivi legati al carico cognitivo. Questa tecnologia incredibilmente flessibile, può essere applicata per effettuare diversi tipi di ricerche e tasks sperimentali.

## **6.2 Dimensione della pupilla per quantificare il carico cognitivo.**

La dimensione della pupilla è determinata dall'azione concorrente di muscoli controllati rispettivamente dal sistema simpatico e dal sistema parasimpatico. L'attività del sistema parasimpatico (che controlla le contrazioni) è dominante, risponde ai riflessi luminosi e determina la baseline della dimensione della pupilla. L'attività simpatica, invece, è connessa con il comportamento e i contesti di stress, e può essere usata come parametro psicofisiologico dell'attività cognitiva.

Uno studio condotto da Palinko et al. (2020) sembra confermare l'affidabilità della pupillometria come misura del carico cognitivo. La ricerca è stata limitata a compiti sull'attenzione sostenuta con bassa variabilità di illuminazione, a causa dell'effetto della luminosità invasiva in contesti reali.

Per questo scopo gli stessi autori hanno presentato un altro contributo sulla possibile separazione degli effetti luminosi invasivi e per rilevare il carico cognitivo nel campo della dilatazione pupillare. Gli autori hanno utilizzato un sistema di illuminazione Aural Vigilance Task (AVT) per creare un ambiente di guida realistico e stimolante, misurando la dilatazione pupillare dei partecipanti mentre svolgevano un compito di guida in diverse condizioni di illuminazione.

I risultati dello studio hanno dimostrato che è possibile distinguere gli effetti luminosi invasivi e determinare il carico cognitivo. In particolare è stato visto come la dilatazione pupillare era maggiore nei partecipanti esposti a luci intense e quando erano impegnati in

compiti di guida impegnativi. Con questo studio è possibile modellare le funzioni psicofisiche della risposta pupillare e mostrare l'andamento durante la prova.

Fanno notare gli autori come le transizioni chiaro/scuro, scuro/chiaro non sono sempre analoghe, visto che differenti gruppi muscolari sono responsabili dei movimenti di contrazione e dilatazione pupillare. La reazione agli stimoli luminosi intensi è più veloce, al fine di proteggere la retina dalla sovraesposizione, mentre la reazione all'oscurità è più graduale.

La funzione psicofisica per predire una baseline attesa del diametro della pupilla dovrebbe prendere in considerazione parametri multipli, come i livelli di luce, la frequenza delle variazioni, l'età e il target. Gli autori concludono che è possibile differenziare gli effetti dell'illuminazione e dello sforzo cognitivo quando si studia il diametro pupillare, e che la dilatazione pupillare potrebbe essere utilizzata per monitorare il livello di attenzione del conducente e per attivare avvisi in caso di pericolo (Palinko & Kun, 2012).

La valutazione fisiologica dei processi cognitivi è diventata un argomento di crescente interesse. Sibley et al. (2011) hanno proposto un interessante approccio sull'applicazione della pupillometria nell'ambito dell'apprendimento e della valutazione del carico cognitivo durante l'allenamento. Il fatto che il diametro della pupilla diminuisce significativamente man mano che i partecipanti apprendano il compito e poi aumenta all'inizio delle difficoltà, supporta l'idea che questa misura possa essere utilizzata per valutare il trasferimento delle informazioni nella memoria a lungo termine. Gli autori suggeriscono che il diametro della pupilla potrebbe essere un indicatore utile per monitorare il processo di apprendimento. Un sistema di questo tipo potrebbe essere in grado di rilevare i livelli del carico cognitivo degli individui in tempo reale e regolare automaticamente la difficoltà del compito o il tipo di feedback fornito per massimizzare l'efficacia di un allenamento specifico. Questo potrebbe portare a un apprendimento più efficiente e personalizzato, adattato alle esigenze e alle capacità specifiche di ciascun individuo.

### **6.3 Interazione tra Stimoli Visivi, Carico Cognitivo e Risposta alla Luce.**

Gli eye-trackers moderni possono tracciare il movimento degli occhi identificando la posizione della pupilla, il che li rende efficaci strumenti per la pupillometria (Binda & Murray, 2015; Mathôt et al., 2016). Questa tecnica registra i cambiamenti nel diametro della pupilla, influenzati non solo dalla luminosità ambientale, con un ritardo di circa 200 ms (Ellis, 1981), ma anche da processi cognitivi ed emotivi interni come l'attenzione, la motivazione, lo sforzo mentale e il carico cognitivo (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000; Einhäuser, 2017; Laeng & Alnaes, 2019; Laeng et al., 2012; Mathôt, 2018a).

Tuttavia, combinare la pupillometria con il tracciamento degli occhi in un singolo esperimento potrebbe non essere sempre consigliabile, a meno che non sia specificamente necessario. Movimenti oculari durante l'esplorazione visiva e adattamenti della pupilla alla luminosità possono introdurre rumore nei dati di pupillometria, soprattutto in presenza di stimoli visivi complessi con variazioni nella luminanza (Binda & Murray, 2015; Mathôt et al., 2017).

Pertanto, è cruciale istruire i partecipanti a mantenere lo sguardo fisso durante la raccolta dei dati. Gli stimoli uditivi possono essere preferibili in questo contesto, mentre quelli visivi devono essere semplici, concentrati nella fovea e con un'illuminazione costante.

Quando si riportano i risultati della pupillometria, è fondamentale descrivere dettagliatamente il setup sperimentale, inclusi il tipo di dispositivo eye-tracker utilizzato e le modalità di controllo della luminosità ambientale. Inoltre, è importante indicare come gli stimoli visivi sono stati adattati alle condizioni luminose e le precauzioni adottate per mantenere costanti i livelli di luminosità nella stanza di sperimentazione.

Anche con eye-tracker economici, è possibile ottenere dati di pupillometria affidabili, poiché questa tecnica si basa su dati individuali anziché su dati aggregati (Titz, Scholz, & Sedlmeier, 2018). Tuttavia, anche con un basso tasso di campionamento, è richiesta una considerevole capacità computazionale per elaborare i dati, poiché spesso è necessario correggere le variazioni rispetto a una baseline stabilita all'inizio dell'esperimento (Mathôt et al., 2018b; Reilly et al., 2019).

Pignoni, G., & Komandur, S. (2019) hanno approfondito il modo in cui i riflessi pupillari possono essere differenziati, gli autori si sono concentrati sul fatto che la pupilla risponde in modo differente agli stimoli luminosi rispetto a quelli psicosensoriali. In

condizioni di illuminazione stazionaria, la pupilla mostra delle pulsazioni irregolari, chiamate riflessi leggeri, che sono il risultato dell'interazione tra i muscoli circolari, responsabili delle contrazioni, e quelli radiali, responsabili della dilatazione.

Il carico cognitivo è stato esaminato nel contesto di questa dinamica, poiché si è osservato che provoca un diverso andamento delle onde rispetto alla condizione di riposo. Durante un carico cognitivo, entrambi i muscoli, circolari e radiali, contribuiscono alla dilatazione pupillare, generando un breve picco di dilatazione. Questo suggerisce che il carico cognitivo può essere misurato non solo in base alla semplice dilatazione costante della pupilla nel tempo, ma anche in relazione alla frequenza e all'intensità di tali picchi. L'analisi wavelet proposta dagli autori costituisce un passo avanti significativo nella comprensione della dinamica pupillare in risposta a stimoli psicosensoriali.

Dato che il diametro della pupilla è influenzato da diversi fattori simultanei, è importante distinguere gli effetti del carico cognitivo da quelli della risposta alla luce. Registrare il diametro pupillare in una specifica condizione luminosa e utilizzare quel valore come riferimento può aiutare a differenziare gli effetti. Watson et al. (2012), hanno sviluppato una formula unificata basata su sette funzioni psicofisiche per prevedere il diametro pupillare in risposta alla luminanza del bersaglio. Questo permette di identificare anche le più piccole variazioni dovute al carico cognitivo. Tuttavia, la formula è valida solo in condizioni di luce e punto di vista costanti e non considera l'adattamento visivo né le fluttuazioni casuali della pupilla.

La relazione positiva tra la dimensione della pupilla e il carico cognitivo è spiegata dalla TEPR (task evoked pupillary response), la quale si è dimostrata un indicatore neurofisiologico affidabile per una vasta gamma di compiti ad alta intensità, come il ragionamento, la percezione e l'uso della memoria a breve termine. Tuttavia, il PLR (pupillary light reflex) rimane l'indicatore più significativo dei cambiamenti nel diametro della pupilla. Eliminare completamente l'effetto del PLR richiederebbe di operare in condizioni di luce stabile, ma ciò è raramente praticabile. Pertanto, è necessario compensare l'effetto del PLR e calcolare continuamente una linea di base per distinguere gli effetti della luce da quelli del carico cognitivo.

Fink et al. (2023) hanno presentato un contributo dove evidenziano una panoramica completa delle tecniche di pre-elaborazione e di modellazione avanzata dei dati pupillari.

Essi offrono agli scienziati cognitivi una guida utile per analizzare le dinamiche della pupilla e il loro rapporto con vari stati corporei e processi cognitivi come l'attenzione e il processo decisionale. Da revisione storica e tecnologica della pupillometria, sottolineano come i progressi tecnologici abbiano reso la pupillometria una metodologia sempre più accessibile e popolare. Andando a delineare come comprendere i fondamenti neurali e i comportamenti oculomotori collegati all'attività pupillare per interpretare correttamente i cambiamenti dinamici della pupilla.

Il loro contributo descrive dettagliatamente i passaggi di pre-elaborazione dei dati pupillari, necessari per preparare il dataset di analisi, come la rimozione di dati improbabili, l'interpolazione di dati mancanti, la correzione per le risposte pupillari ai Blinks e alle saccadi, e l'importanza della correzione della posizione dello sguardo e della normalizzazione dei dati pupillari. Attraverso esempi pratici come riferimenti e pubblicazioni chiave gli autori forniscono ai ricercatori le conoscenze e gli strumenti necessari per sfruttare al meglio i dati pupillari (Fink et al., 2023).

## **6.4 Pupillometria e Fatica visiva.**

In un contesto di scienza dello sport e dell'esercizio fisico, la fatica è un concetto elusivo che può essere indotto sia cognitivamente che fisicamente. I due domini della fatica hanno implicazioni importanti per le prestazioni umane (Bafna & Hansen, 2021; Roelands et al., 2021). Negli ultimi dieci anni, la "fatica mentale" ha guadagnato notevole attenzione. Questo costrutto può essere definito come uno stato psicobiologico indotto durante un'attività cognitiva prolungata e impegnativa e che risulta in una sensazione soggettiva di stanchezza, diminuita capacità cognitiva e/o alterata attivazione cerebrale (Pattyn et al., 2018). La fatica mentale è un costrutto chiaramente rilevabile nella vita quotidiana: può insorgere anche dopo limitate quantità di lavoro cognitivo facendo aumentare il rischio di errori in molti ambiti (Janhofer, et al., 2019). Per quanto riguarda le prestazioni sportive, essa influisce non solo sugli aspetti cognitivi come l'attenzione, ma anche su aspetti fisici come la resistenza e le prestazioni psicomotorie specifiche dello sport (Habay et al., 2021). La natura esatta di questi cambiamenti nelle prestazioni deve ancora essere chiarita, poiché misurazioni periferiche come il lattato nel sangue, la frequenza cardiaca e la funzione neuromuscolare rimangono sostanzialmente invariate

dalla fatica mentale (Van Cutsem et al 2017). Il cambiamento più consistente come risultato della fatica mentale è l'aumento della percezione dello sforzo (Roelands et al., 2021).

Un meccanismo ipotizzato dietro l'insorgenza e gli effetti della fatica mentale è l'accumulo di adenosina nel cervello (Meeusen et al., 2021). È stato indirettamente dimostrato che la concentrazione di adenosina cerebrale aumenta a causa dello sforzo mentale (Roelands 2022). Questo aumento inibisce il rilascio presinaptico dei neurotrasmettitori, riducendo essenzialmente l'attività neurale nelle aree cerebrali specifiche del compito. Un'area del cervello comunemente collegata all'attivazione della fatica mentale specifica del compito è la corteccia prefrontale, specificamente la corteccia cingolata anteriore (De Wachter et al., 2021). Quest'area del cervello è responsabile di molte importanti funzioni cognitive, inclusi il controllo emotivo, la pianificazione, l'attenzione e l'autoregolazione. La corteccia prefrontale è stata implicata come un'area importante nel processo decisionale dell'esercizio fisico, ad esempio, la decisione di smettere di esercitarsi a causa di un aumento dello sforzo. Inoltre, l'adenosina può influenzare la motivazione durante compiti specifici, poiché può inibire il rilascio di dopamina e modificare l'affinità dei recettori della dopamina. Anche se questa è un'ipotesi promettente, dovrebbero essere raccolte prove dirette per confermarla (Wei et al., 2011).

Gli studi sugli effetti della fatica mentale e la ricerca sull'insorgenza della fatica mentale durante le competizioni sono ancora agli inizi. Un numero limitato di studi ha già quantificato l'evoluzione della fatica mentale durante una competizione, o su un campo di allenamento, altri hanno tentato di identificare le possibili cause dietro l'insorgenza della fatica mentale. Queste prove hanno confermato che la fatica mentale può aumentare durante una competizione di più giorni (ad esempio nel padel) e durante una stagione regolare in uno sport di squadra come il netball (Díaz-García et al., 2021; Russell et al., 2021). Quindi non solo è importante che vengano ulteriormente sviluppati strumenti di misurazione validi per quantificare la fatica mentale in contesti pratici, ma bisogna capire la natura esatta e le cause di questo fenomeno al di fuori di un ambiente di laboratorio.

Recentemente, alcuni autori hanno condotto una revisione su varie metodologie, tra cui misure fisiologiche e comportamentali delle prestazioni, al fine di identificare un metodo robusto e obiettivo per rilevare la fatica (Karim et al., 2024). Tra queste metodologie, la pupillometria emerge come una misura di rilievo. La pupilla, il cui diametro varia in base alla luce e all'attenzione, è controllata dal sistema nervoso autonomo. Questo sistema è influenzato da diversi neurotrasmettitori, come l'adenosina, coinvolta nella regolazione del sonno e della vigilanza, e l'adrenalina; quest'ultima svolge un ruolo stimolante aumentando l'attività del sistema nervoso simpatico responsabile della risposta di "combattimento o fuga" del corpo. Questo fenomeno si traduce in un aumento della frequenza cardiaca, della pressione sanguigna e della disponibilità di energia. Inoltre, l'adrenalina stimola la dilatazione delle pupille, andando a migliorare la percezione visiva in situazioni di pericolo. Dunque, un'ampia dilatazione della pupilla può indicare un maggiore livello di vigilanza (Martin, et al., 2022). Tuttavia, è cruciale sottolineare che la relazione tra la concentrazione di adenosina e dilatazione pupillare è complessa e merita di attenzione in quanto può essere influenzata da molti fattori, quali l'attività neuronale e lo stato di attività del soggetto (Larsen & Waters, 2018).

Nel 2021, Bafna e Hansen hanno esaminato l'applicabilità del tracciamento oculare per valutare l'affaticamento mentale, analizzando un ampio spettro di tecniche valutative. L'indagine ha identificato 21 caratteristiche oculari raggruppate in otto categorie. Gli autori hanno sottolineato l'importanza delle saccadi come indicatori chiave dell'affaticamento mentale, rivelando come la media delle saccadi e la velocità di picco possono fornire accesso rapido agli stati cognitivi entro 30 minuti dall'inizio dell'attività (Bafna & Hansen, 2021). Il tracciamento oculare è stato utilizzato per sviluppare un modello efficace di rilevamento della fatica in diversi ambiti (Yamada & Kobayashi, 2018; Hu & Lodewijks, 2020). Numerose ricerche hanno dimostrato che i parametri saccadici come la velocità di picco, l'ampiezza, la durata e la pendenza della sequenza principale (velocità/ampiezza di picco) sono sensibili al livello di fatica (Di Stasi et al., 2012; 2013; Zargari Marandi et al., 2018).

La pupilla modifica temporaneamente il suo diametro in risposta a stimoli esterni: si contrae con un incremento della luminosità ambientale, per favorire un'elaborazione visiva più efficiente (Woodhouse & Campbell, 1975; Laughlin, 1992) e si espande alla

presentazione di stimoli emotivi (Morad et al., 2000; Partala & Surakka, 2003; Bradley et al., 2008; Kashihara et al., 2014; Cherng et al., 2020). È particolarmente rilevante che le regioni cerebrali responsabili del controllo dei movimenti saccadici degli occhi, inclusi il collicolo superiore (SC) e il campo oculare frontale (FEF), rivestano un ruolo primario anche nella regolazione del diametro pupillare (Wang et al., 2012; Joshi et al., 2016; Ebitz & Moore, 2017; Wang & Munoz, 2018; Wang & Munoz, 2021; Hsu et al., 2021). Questo porta a chiedersi se le variazioni del diametro pupillare sono influenzate anche dal grado di fatica.

Nel 2022, Chen e i suoi collaboratori hanno condotto uno studio per esaminare come la fatica e le dimensioni della pupilla influenzino le reazioni degli occhi e le risposte pupillari in due differenti esperimenti. I risultati hanno rivelato che all'aumentare del tempo trascorso in un compito, la velocità delle reazioni oculari diminuiscono, così come le dimensioni e le risposte della pupilla. Gli autori hanno inoltre osservato che pupille di dimensioni maggiori erano associate a reazioni oculari più veloci, suggerendo un legame tra eccitazione e impegno cognitivo. In un secondo esperimento, utilizzando suoni emotivi per indagare l'influenza delle reazioni oculari, è emerso che sia la fatica che le dimensioni della pupilla hanno un impatto significativo sulle prestazioni. Questi risultati indicano chiaramente che sia le reazioni oculari che le dimensioni della pupilla sono influenzate dai livelli di fatica ed eccitazione, fornendo preziosi spunti sull'analisi del comportamento umano (Chen et al., 2022).

Le evidenze presentate offrono una panoramica chiara sul ruolo della pupillometria nella rappresentazione obiettiva e multidimensionale dello stato fisiologico, emotivo e cognitivo tramite i riflessi pupillari. I recenti progressi tecnologici nei pupillometri infrarossi portatili di ultima generazione (HQIP) hanno ulteriormente consolidato il loro ruolo, consentendo misurazioni precise e ad alta frequenza con applicazioni sempre più diffuse, anche in contesti sportivi. In uno studio pilota del 2024 sull'utilizzo della pupillometria per monitorare la fatica indotta dal gioco nel basket professionistico femminile, gli autori hanno esplorato l'applicazione della pupillometria mediante l'utilizzo di pupillometri infrarossi quantitativi portatili (HQIP) come metodo innovativo per monitorare la fatica nelle atlete professioniste di basket (Huyghe et al., 2024). Tra gli obiettivi principali degli autori c'erano la valutazione della ripetibilità nel tempo delle

misurazioni pupillometriche per verificarne l'affidabilità; l'indagine della correlazione tra le variazioni pupillometriche e altri biomarcatori di fatica per stabilire se i cambiamenti nel diametro pupillare potessero fungere da indicatori attendibili di fatica; e il monitoraggio nel tempo delle pupille durante le fasi di impegno fisico e di recupero, con lo scopo di comprendere se la pupillometria potesse efficacemente valutare i processi fisiologici legati alla fatica. I risultati hanno dimostrato una buona ripetibilità nel tempo delle misurazioni pupillometriche del diametro massimo e minimo della pupilla, confermando l'affidabilità di queste misure. Inoltre, è emersa una correlazione significativa tra le variazioni pupillometriche e altri biomarcatori di fatica, suggerendo che le modifiche nel diametro pupillare possano effettivamente servire come indicatori attendibili dello stato di fatica. Infine, l'analisi del corso temporale delle metriche pupillometriche ha rivelato differenze significative tra gli stati di riposo e di fatica, indicando che la pupillometria può riflettere efficacemente i processi fisiologici associati alla fatica e al recupero. Questi risultati supportano l'utilizzo della pupillometria come strumento non invasivo e affidabile per il monitoraggio della fatica, offrendo nuove prospettive per la gestione della performance atletica (Huyghe et al., 2024).

In conclusione L'approfondimento delle dimensioni fisiologiche, emotive e cognitive della fatica attraverso la pupillometria offre un'innovativa finestra di comprensione nell'ambito dello sport e dell'esercizio fisico. L'integrazione di questa tecnologia avanzata consente non solo una valutazione più accurata e affidabile dello stato di fatica degli atleti, ma apre anche nuove strade per la gestione ottimale delle prestazioni sportive. Attraverso la correlazione tra le variazioni pupillometriche e altri biomarcatori di fatica, si delineano prospettive promettenti per un monitoraggio più completo e preciso delle condizioni fisiche e cognitive durante l'attività sportiva. L'evoluzione della ricerca in questo campo promette di fornire non solo un maggiore insight sui meccanismi sottostanti alla fatica, ma anche strumenti pratici per migliorare le prestazioni degli atleti e ottimizzare la gestione della loro salute e benessere.

# CAPITOLO 7: MOTORSPORT E EYE TRACKING

## 7.1 Introduzione

Il Motorsport si riferisce a quell'insieme di discipline sportive in cui gli atleti guidano veicoli a motore in una competizione che può essere sia su pista o lungo un percorso predefinito. Questo campo si suddivide in diverse categorie che racchiudono una serie di discipline. L'automobilismo è una di queste dove la resa dell'autovettura e l'abilità del pilota richiedono complesse abilità tecniche, fisiche e mentali.

Attualmente esistono pochi studi che possano offrire indicazioni per un intervento finalizzato a migliorare la prestazione mentale del pilota; infatti, la ricerca negli anni si è concentrata maggiormente sullo sviluppo tecnologico del mezzo sportivo, trascurando le capacità prestazionali dei Piloti coinvolti nei campionati. Esaminare i fattori psicofisiologici dei piloti, in situazioni di guida agonistica, potrebbe contribuire a tutelare la salute e la sicurezza del pilota stesso, oltre a potenziare la performance.

La sensibilità nel saper condurre il veicolo, la resistenza allo stress e la preparazione fisica, sono elementi fondamentali per raggiungere l'optimum psicofisico del Pilota. All'interno di queste abilità rientra anche la prestazione visiva, che si palesa come una capacità essenziale da non sottovalutare.

A dimostrazione di questo è stato visto come determinati atleti sviluppino abilità visive superiori rispetto ai non-atleti negli sport caratterizzati da velocità elevata, richiedendo un'acuità visiva dinamica (DVA) superiore (Rouse, DeLand, Christian, & Hawley, 1988).

I movimenti anormali a cui sono sottoposti i piloti di motorsport pongono sfide significative sulla loro acuità visiva dinamica, rendendo il focus visivo sul tracciato e sui veicoli presenti in pista estremamente difficile (Schneiders et al., 2010; Mansfield & Marshall, 2001). La DVA è quindi strettamente collegata ai movimenti oculari, che sono a loro volta connessi a diversi processi cognitivi, come: l'attenzione, la memoria,

l'apprendimento e il decision making. Questi processi sono in grado di influenzare l'elaborazione delle informazioni insieme all'abilità di adattamento rapido ai cambiamenti (Underwood, Crundall & Chapman, 2011; Orquin & Mueller Loose, 2013; Marquart, Cabrall & de Winter, 2015; Guidetti et al., 2019).

I piloti sportivi sono stati indagati sui tempi di reazione, forza, postura e infortuni (Mansfield & Marshall, 2001; Backman et al., 2005; Baur et al., 2006), ma poco è stato fatto rispetto alle loro abilità di performance visiva, motoria, percettiva e cognitiva (Owen, King & Lamb, 2015; Potkanowicz & Mendel, 2013). La conoscenza di queste abilità potrebbero aiutare nella progettazione di metodi di allenamento alternativi deputati al miglioramento delle interfacce pilota-veicolo (Baldisserri et al., 2014; Lappi, 2015).

## **7.2 Modello prestativo del Pilota Automobilistico.**

La prestazione della gara in pista del pilota è ampiamente indagata grazie ai sistemi telemetrici che forniscono in dettaglio i dati sulla conduzione del mezzo in pista. Sulla comprensione riguardo il controllo dell'autovettura grazie alle capacità psicofisiche del pilota è ancora poco indagato e poco compreso dagli esperti di settore. Grazie all'utilizzo della tecnologia oggi è possibile monitorare anche il comportamento e le reazioni del pilota in situazioni di forte stress. I veri fattori stressogeni che incidono durante la gara sono stati ampiamente studiati (Potkanowicz & Mendel, 2013).

Potkanowicz e Mendel hanno evidenziato diverse caratteristiche che influenzano il rendimento del pilota automobilistico:

- 1) La Velocità, che rende la situazione prestazionale estremamente complessa e difficile da gestire durante la gara;
- 2) Il Multitasking, il pilota deve saper gestire più aspetti comportamentali contemporaneamente;
- 3) Gestione della durata delle gare lunghe e continue, nell'automobilismo le gare possono durare oltre due ore senza pause e richiedono un consumo di ossigeno simile a quello di altri atleti professionisti;
- 4) La gestione delle accelerazioni, che richiedono una notevole forza fisica;
- 5) Lo stress termico, soprattutto nelle competizioni con vetture ad abitacolo chiuso;

- 6) lo stress fisiologico e psicologico, che, sebbene poco conosciuto, sta diventando oggetto di ricerca grazie all'evoluzione tecnologica.
- 7) Infine, la costante presenza del pericolo aggiunge ulteriori pressioni sui piloti. Questo processo rappresenta un passo fondamentale per comprendere meglio le caratteristiche prestazionali richieste dall'automobilismo sportivo e per identificare metodologie sicure ed efficaci per l'allenamento specifico.

### **7.3 Aspetti Psicologici del Pilota Sportivo**

Nel campo dell'automobilismo sportivo, sono state oggetto di studio diverse caratteristiche psicologiche che entrano nella sfera caratteriale, come la ricerca di sensazioni intense e la propensione al rischio. Secondo Zuckerman (1994), la ricerca di sensazioni intense, definita anche come *sensation seeking*, rappresenta il desiderio di sperimentare nuove e intense esperienze, spesso a scapito della sicurezza, per il piacere che ne deriva. Questo tratto di personalità è spesso associato ai "sport a rischio", come il paracadutismo, il volo in deltaplano e l'automobilismo, in cui il pericolo personale è elevato in caso di incidente.

Un recente studio condotto da Aluja nel 2023 ha messo in luce il ruolo fondamentale sia dei tratti della personalità che degli stili decisionali nei comportamenti di guida a rischio. Si è evidenziato che l'aggressività, la sensibilità alla ricompensa e la ricerca di sensazioni eccitanti giocano un ruolo predominante tra i tratti della personalità. Inoltre, sia lo stile decisionale spontaneo che razionale sono stati identificati come fattori determinanti nelle variazioni dei comportamenti di guida rischiosi (Aluja et al., 2023).

Un altro ambito di ricerca psicologica nell'automobilismo si concentra sugli aspetti emotivi affrontati durante la guida. I piloti devono gestire emozioni intense, spesso stressanti, legate sia agli elementi ambientali che ai compiti psicomotori richiesti dalla guida. La letteratura riconosce che la difficoltà nel gestire queste emozioni può portare a stati di affaticamento e influenzare negativamente le prestazioni di guida. È noto che un'incapacità nel controllare le emozioni è una delle principali cause di incidenti stradali (Katsis, Katertsidis, Ganiatsas e Fotiadis, 2008), poiché l'ira o lo stress possono compromettere la valutazione delle situazioni e la capacità di reazione del guidatore, con conseguenze potenzialmente gravi, specialmente in competizioni ad alta velocità.

L'ansia è stata oggetto di numerosi studi nel contesto sportivo, con un crescente interesse negli ultimi decenni riguardo al suo impatto sulle performance atletiche, incluso il suo ruolo nell'automobilismo. Ricerche come quella condotta da Murray e Janelle (2003) hanno dimostrato che l'ansia può influenzare sia le prestazioni che l'efficienza dei processi cognitivi coinvolti. In particolare, livelli elevati di ansia possono compromettere la tempestività e l'accuratezza delle risposte del pilota durante la guida. Inoltre, gli autori hanno evidenziato che sia i gruppi con che senza ansia hanno mostrato un aumento nella ricerca visiva durante la competizione, indicando una riduzione dell'efficienza nell'elaborazione delle informazioni (Murray & Janelle, 2003).

Ulteriori indagini, come quella condotta da Edmonds e colleghi nel (2008), hanno esplorato gli aspetti emotivi della guida attraverso l'uso del modello IZOF (Individual Zones of Optimal Functioning) di Hanin (2000). Questo modello identifica un insieme unico di emozioni e stati psicofisiologici che possono influenzare positivamente o negativamente le prestazioni individuali. Lo studio ha dimostrato l'efficacia delle strategie di autoregolazione emotiva nel migliorare le prestazioni, enfatizzando al contempo l'importanza di approcci personalizzati (Edmonds et al., 2008). Ulteriori studi hanno approfondito le condizioni psicofisiologiche legate alle performance di guida, adottando un approccio idiosincratico e multidimensionale come il modello MAP (Multi-Action Plan Model). Queste ricerche hanno confermato l'importanza di considerare i profili psicofisiologici individuali per ottimizzare le prestazioni degli atleti automobilistici (Filho et al., 2015). I processi cognitivi svolgono un ruolo fondamentale nell'ambito della guida automobilistica, considerando l'importanza dell'attenzione, della memoria e della consapevolezza per la sicurezza stradale e le performance sportive. I bias cognitivi possono comportare conseguenze gravi sia sulla sicurezza che sulle prestazioni di guida, sottolineando l'importanza cruciale della valutazione di variabili come la consapevolezza situazionale e il carico di lavoro mentale (Borghini et al., 2014).

L'analisi degli aspetti psicologici del pilota automobilistico rivela l'importanza di concentrarsi sull'analisi delle caratteristiche personali, degli stili decisionali e degli stati emotivi nel determinare le prestazioni di guida. Attraverso approcci multidimensionali e individualizzati, la ricerca continua a migliorare la comprensione di come questi fattori influenzino la sicurezza e l'efficacia dei piloti. Tuttavia, resta essenziale perseguire

ulteriori studi per sviluppare strategie pratiche e mirate che possano ottimizzare le prestazioni dei piloti e migliorare la sicurezza su strada.

## **7.4 Aspetti fisiologici del pilota sportivo**

Nella complessa interazione tra uomo e mezzo, la fisiologia del pilota assume un ruolo di rilievo paragonabile a quello delle più avanzate tecnologie di guida autonoma. L'analisi delle variazioni fisiologiche negli atleti durante le competizioni, quali l'incremento della frequenza cardiaca, lo sforzo muscolare e l'aumento della temperatura corporea, aprono nuove prospettive nella comprensione della prestazione sportiva (Bertrand, et al., 1983; Ebben, 2010; Yamakoshi et al., 2010).

La frequenza cardiaca elevata, persistente durante la guida sportiva, sottolinea l'impegno fisico e psicologico richiesto. Questo aspetto è influenzato non solo dall'esercizio fisico, ma anche dallo stress fisico a cui sono sottoposti i piloti, oltre che da fattori legati alla risposta del sistema nervoso simpatico e dalle variazioni ormonali correlate a stati emozionali e cognitivi specifici della competizione.

Questa risposta cardiaca elevata non è un fenomeno nuovo; già nel 1967, Taggart e Gibbons osservarono in piloti esperti un significativo aumento della frequenza cardiaca, che rimaneva elevata per l'intera durata della competizione, indicando un alto livello di stress fisiologico senza sintomi particolari, a parte una sensazione di nervosismo (Taggart & Gibbons 1967). Questi dati sono stati confermati in studi successivi che hanno registrato valori medi di frequenza cardiaca superiori a 170 bpm durante le competizioni, inclusi quelli condotti su piloti del campionato V8 Supercar (Potkanowicz & Mendel, 2013).

Un'analisi approfondita della variabilità della frequenza cardiaca (HRV) offre ulteriori insight sull'adattamento psicofisico del pilota alle diverse sfide della competizione. Una buona HRV indica un efficace bilanciamento tra l'attività del sistema nervoso simpatico e parasimpatico, essenziale per un'ottimale risposta alle varie esigenze. Tuttavia, periodi di stress mentale possono ridurre questa variabilità, segnalando potenziali difficoltà nell'adattamento alle condizioni di gara (Wilson & Somers, 2011).

Parallelamente, la tecnologia EEG ha permesso di indagare le variazioni dello stato mentale dei piloti attraverso l'analisi delle frequenze corticali, offrendo spunti

significativi sul carico mentale, la fatica e la sonnolenza. Questi studi hanno evidenziato come lo stato di fatica mentale e la sonnolenza possano influenzare negativamente le prestazioni di guida, con un calo dell'attenzione e della capacità di risposta a situazioni impreviste (Borghini, et al., 2014).

La risonanza magnetica funzionale (fMRI), utilizzata in studi passati, ha ulteriormente ampliato la nostra comprensione dell'efficienza neurale nei piloti esperti rispetto ai novizi. I risultati hanno suggerito che l'esperienza di guida ad alta velocità contribuisce a una maggiore efficienza neurale, evidenziata da un minor coinvolgimento di aree corticali durante compiti di reazione visuo-motoria e visuo-spaziale, nonché da connessioni più forti tra queste aree (Bernardi et al., 2014).

Queste scoperte enfatizzano l'importanza di un approccio integrato nello studio della performance di un pilota da corsa ponendo uno sguardo verso la valutazione delle prestazioni di guida anche a livello psicofisico.

## **7.5 Tracciamento oculare e automobilismo sportivo**

Gli studi passati hanno messo in luce come l'esperienza influisca sulle strategie visive adottate dai piloti in situazioni di guida simulata, sottolineando che i piloti esperti si avvalgono di meno risorse cognitive per il controllo del veicolo, grazie all'impiego di abilità visive automatiche e intuitive. Permettendo loro di dedicare l'attenzione ad altri aspetti della guida (Kountouriotis et al., 2012; Lappi, 2014).

Land e Tatler (2001) hanno osservato che i piloti di corse adottano strategie di sguardo distintive, ottimizzano il percorso visivo in curva per massimizzare la velocità di uscita andando a migliorare i tempi sul giro. Questo risultato non è attribuibile solo ai movimenti oculari, ma anche a una coordinazione manuale più efficace. Infatti è stato evidenziato come i piloti esperti ruotino la testa con maggiore rapidità e precisione rispetto ai non esperti, mantenendo le fissazioni visive sui punti cruciali della traiettoria di guida (Land e Tatler, 2001; Guidetti et al., 2019). Queste ricerche sottolineano l'importanza di focalizzare l'attenzione sui punti giusti e minimizzare i movimenti saccadici per ottimizzare le prestazioni di guida (Chopra-Khullar & Badler, 2001).

Takaaki Kato nel (2019) ha esplorato i comportamenti visivi e le abilità percettivo-motorie dei piloti da corsa, utilizzando una combinazione di guida simulata e tecnologie

di tracciamento oculare per distinguere esperti, intermedi e principianti. Attraverso le analisi prestative di guida e dei movimenti oculari di 15 soggetti con diversi livelli di esperienza, ha evidenziato che i piloti esperti non solo completano i giri in tempi significativamente migliori rispetto ai meno esperti, ma dimostrano di essere molto più veloci e di avere un controllo più fine e strategico del freno e dell'acceleratore, nonché una maggiore variabilità nei movimenti dello sterzo durante le curve. Inoltre gli esperti effettuano un numero maggiore di fissazioni con minor frequenza di ammiccamenti e rivolgono lo sguardo oltre il punto di tangenza nelle curve, indicando una strategia di ricerca visiva più sistematica rispetto ai principianti (Kato, 2019).

La capacità visiva è cruciale per un pilota, soprattutto ad alte velocità, poiché comprendere i dettagli può essere determinante in gara. L'acuità visiva, ovvero la capacità di vedere chiaramente dettagli distanti sulla pista, non solo aiuta a evitare pericoli ma consente anche di anticipare determinate manovre.

Schneiders nel (2010) ha esplorato le capacità visive dei giovani piloti d'élite, effettuando un confronto con un gruppo di controllo, per determinare i livelli superiori di acuità visiva. Attraverso un design osservazionale svolto in un laboratorio universitario specializzato, il team di ricerca ha sottoposto nove giovani piloti d'élite della Nuova Zelanda e nove soggetti sani di controllo a test di performance visiva che includevano Acuità Visiva Statica (SVA), Acuità Visiva Dinamica (DVA), Test di Stabilizzazione dello Sguardo (GST) e il Test del Tempo di Percezione (PTT). I risultati hanno rivelato che gli atleti d'élite avevano un'acuità visiva superiore rispetto ai controlli in tutte le misure, suggerendo di possedere una capacità superiore nella percezione visiva temporale rispetto ai controlli. Questo studio ha evidenziato l'importanza di questo campo sulle prestazioni visive negli sport di velocità, mettendo in luce il potenziale vantaggio che un'elevata acuità visiva e un rapido tempo di percezione possono offrire ai piloti d'élite un miglior controllo per minimizzare i rischi di potenziali incidenti. Gli autori inoltre sottolineano la necessità di indagini più approfondite sull'abilità visiva in contesti sportivi ad alta velocità (Schneiders et al., 2010).

Recenti sviluppi tecnologici stanno aprendo nuove frontiere nella neuroscienza, consentendo registrazioni simultanee del movimento del corpo e dell'attività cerebrale di individui altamente esperti mentre dimostrano le loro eccezionali abilità in condizioni

reali su pista. Queste registrazioni offrono preziose opportunità per comprendere la struttura neurocomportamentale dell'esperienza umana. Ad esempio, uno studio condotto da Rito Lima et al. (2020) ha esplorato i parametri di un Campione di Formula E durante una sessione di guida su un circuito ad alta velocità in condizioni estreme. Gli autori hanno registrato l'attività cerebrale, insieme ai movimenti oculari e corporei, durante la guida in condizioni di pista bagnata e scarsa visibilità. I risultati hanno evidenziato correlazioni significative tra l'attività cerebrale e i movimenti del corpo, suggerendo una causalità tra attività cerebrale e movimento. Durante le curve strette, dove il controllo della vettura è più impegnativo, si sono verificati cambiamenti sia nell'attività dell'EEG che nei pattern visivi. Questi risultati hanno fornito una visione completa delle abilità motorie e cognitive in situazioni di alta pressione, aprendo nuove prospettive di ricerca sull'esperienza umana attraverso un efficace controllo anche da remoto sull'acquisizione di informazioni cerebrali e visive in condizioni estreme (Rito Lima et al., 2020).

Altri studi hanno esplorato i movimenti oculari e i comportamenti dei piloti di rally in condizioni di guida su strada sterrata, focalizzandosi sulle differenze tra i piloti professionisti del campionato mondiale (WRC) e quelli di categorie minori. Dodici piloti di rally e un campione del mondo WRC hanno partecipato a un esperimento utilizzando un eye tracker mobile durante la guida su un percorso di prova lungo circa 3.2 km su terreno sterrato. L'analisi ha rivelato che i piloti WRC adattano attentamente la loro attenzione visiva, anticipando ostacoli e condizioni della strada, mentre gli altri piloti si concentrano principalmente sugli aspetti immediati del percorso. Questi risultati indicano che le strategie visive dei piloti WRC consentono loro di guidare in modo sicuro, con una maggiore consapevolezza delle curve imminenti, potenzialmente riducendo il carico cognitivo associato alla guida e richiamando ricordi positivi delle esperienze passate in gara (Hariyama & Kato, 2019).

Nel contesto altamente competitivo degli sport motoristici, dove anche i più piccoli guadagni in termini di prestazione possono fare la differenza, la capacità di quantificare e analizzare dati visivi dettagliati dei piloti assume un ruolo cruciale. Lo studio di Xia et al. (2023) presenta un innovativo sistema di tracciamento oculare in tempo reale, economico e indossabile, progettato specificamente per le applicazioni nel motorsport. Montato su un casco da corsa, questo sistema utilizza una configurazione a doppia camera

per catturare sia l'immagine dell'occhio che la vista frontale, permettendo di monitorare in tempo reale lo sguardo del pilota. Il cuore tecnologico di questo sistema è un modulo ESP32, che gestisce l'acquisizione delle immagini e la trasmissione dei dati tramite Wi-Fi, affrontando la sfida dei sistemi di tracciamento oculare tradizionalmente costosi e promuovendo una maggiore accessibilità in questo settore. Il sistema sfrutta Open CV-Python per l'elaborazione delle immagini oculari e calcola le coordinate dello sguardo, che vengono poi mappate sulla vista frontale per determinare con precisione la direzione dello sguardo del pilota. I test condotti hanno dimostrato una buona accuratezza del sistema, con un angolo di deviazione di 3,8 gradi. Questi risultati rappresentano un significativo passo avanti nell'abbattimento delle barriere economiche e tecniche per l'adozione di tecnologie di tracciamento oculare nel motorsport, offrendo nuove possibilità per l'analisi delle prestazioni di guida e la sicurezza dei piloti (Xia et al., 2023).

L'impiego di tecnologie a basso costo per il tracciamento oculare in ambiti sportivi ad alta dinamicità non è più un'aspirazione remota. Nell'era attuale, caratterizzata dall'emergere di startup e soluzioni tecnologiche avanzate, è diventato possibile monitorare parametri e pattern visivi che mostrano una correlazione significativa con le prestazioni dei piloti. Nel 2023, Nishizono et al. hanno introdotto un'innovativa prospettiva di ricerca, focalizzandosi sulla sincronizzazione degli ammiccamenti tra piloti di vario livello di esperienza durante simulazioni di gare su pista. Questo studio si distingue per l'attenzione rivolta al comportamento oculomotorio, in particolare analizzando gli ammiccamenti come indicatori delle prestazioni. I risultati hanno evidenziato che una maggiore sincronizzazione degli ammiccamenti, sia all'interno dei singoli giri di ciascun pilota sia tra piloti di diverso livello, è associata a prestazioni migliorate. Questa sincronizzazione non solo riflette uno stato di elevata attenzione cognitiva, ma suggerisce anche che la capacità di coordinare efficacemente tali movimenti oculari possa costituire una strategia vincente per ottimizzare l'efficienza di guida.

La presenza di numerosi stimoli sensoriali mette a dura prova l'impegno cognitivo del pilota per mantenersi in equilibrio con l'ambiente circostante (Gray, 2008). Questo processo è fondamentale quando è alla guida, poiché il pilota è costretto a fronteggiare informazioni provenienti da vari canali: visivi, uditivi, vestibolari, propriocettivi e tattili.

Tali informazioni sono cruciali per la sua capacità di adattamento. Tuttavia, per evitare un sovraccarico informativo, solo una frazione di queste informazioni viene filtrata e processata per sviluppare strategie motorie e memorizzare risposte motorie adattive (Piechulla et al., 2003).

La sua attenzione selettiva, che può essere affinata con l'esperienza e l'allenamento (Turner & Richards, 2015). Diversi fattori, tra cui, la memoria, la motivazione, la decisione, influenzano la buona condotta di guida. In particolare, mentre il pilota è alla guida, si vede costretto a fissare l'attenzione sugli elementi presenti nel suo campo visivo. Questo processo è supportato da vari meccanismi di movimento oculare, che insieme ad altri fattori lo aiutano a mantenere attento visivamente sul bersaglio ritenuto più rilevante (Goettker & Gegenfurtner, 2021).

Le saccadi permettono al pilota di spostare rapidamente l'attenzione da un punto all'altro senza percepire lo spostamento dell'immagine, un fenomeno noto come oscillopsia. Per evitare questo disturbo, il cervello implementa un meccanismo di soppressione visiva durante le saccadi, noto come mascheramento saccadico, che rende di fatto invisibili i cambiamenti del campo visivo durante i movimenti oculari rapidi. (Crevecoeur & Kording, 2017).

Tramite l'allenamento, è possibile convertire le saccadi riflesse, originariamente involontarie, in saccadi centrali, permettendo agli occhi del pilota di muoversi verso un punto memorizzato senza stimoli visivi diretti. Questi meccanismi oltre ad evidenziare la complessità del sistema visivo e cognitivo, sottolineano l'importanza dell'attenzione e dell'allenamento per incrementare l'interazione ambientale, specialmente in contesti dinamici (Guidetti et al., 2019).

La guida è un'attività complessa che si distingue nettamente dal camminare, richiede un'elaborazione complessa di processi legati alla percezione del movimento e alle grandezze fisiche come velocità e accelerazione. Diversamente dal cammino, dove l'obiettivo è mantenere un percorso rettilineo verso la destinazione, guidare implica navigare in un ambiente variabile di curve e rettilinei, dove gli spazi sono limitati nella larghezza e bisogna mantenere traiettorie precise per rimanere in sicurezza tra i bordi di una corsia (Warren & Fajen, 2004). Questa necessità di adeguamento continuo richiede modalità particolari di controllo visivo e anticipazione, soprattutto in curva, dove la

combinazione di velocità adeguata e sterzata precisa diventa essenziale (Lappi & Mole, 2018).

La gestione della sterzata in ambito automobilistico è supportata da due strategie principali, entrambe basate sull'elaborazione delle informazioni visive: il campionamento di punti visivi e l'orientamento verso un punto predefinito (Wann & Swapp, 2000; Wilkie et al., 2010). La capacità visiva in scenari dinamici è influenzata da diversi fattori come la velocità del veicolo, la conformazione della strada e la presenza di elementi statici o mobili nel campo visivo.

L'esperienza riveste un ruolo cruciale nella riduzione del rischio di incidenti (Ehsani et al., 2020). È dimostrato che la capacità di gestire l'attenzione visiva, sia foveale che periferica, migliora con l'esperienza diretta, agendo direttamente sulla sicurezza (Crundall et al., 2002; Robbins & Chapman, 2019). Le strategie efficaci di ricerca visiva, sviluppate attraverso la pratica, sono fondamentali per il passaggio da conducente inesperto a esperto, con l'attenzione visiva che svolge un ruolo chiave nella prevenzione degli incidenti (Crundall et al., 2004; Underwood et al., 2008).

Anche in altri contesti l'impiego dell'eye tracking ha rivelato differenze significative nei movimenti oculari tra conducenti esperti e non esperti, specialmente mentre si affrontano le curve (Shinar et al 1977; Underwood, 2007). In situazioni complesse come gli incroci, sono comuni numerosi movimenti saccadici dei conducenti (Sudkamp et al., 2021). Fattori come la guida notturna o la pioggia possono far aumentare il carico cognitivo, influenzando le capacità di elaborazione visiva, spingendo i conducenti verso strategie oculomotorie specifiche per una rapida acquisizione visiva (Kronsbein et al., 1994; Galley, 1993; MacDougall & Moore, 2005).

L'esperienza e l'allenamento contribuiscono a migliorare l'efficacia del sistema oculomotorio, rendendo i conducenti esperti più efficienti nella raccolta di informazioni rilevanti e nella gestione di situazioni pericolose (Crundel et al., 1998; Konstantopoulos et al., 2010). I piloti addestrati tendono a concentrare l'attenzione su elementi che riducono i rischi, evidenziando l'importanza di una scansione efficace dell'ambiente per prevenire incidenti (McKnight et al., 2003; Pradhan et al., 2009).

Nell'ambito della guida sportiva, diventa cruciale sapere dove guardare per ottimizzare la performance e minimizzare i movimenti saccadici superflui (Chopra, 1999; Causer et

al., 2003). La teoria dell'ipotesi del carico cognitivo di Lavie propone un modello che spiega come la capacità di escludere elementi distraenti dipenda dal carico cognitivo generato dall'elaborazione di stimoli rilevanti (Lavie & Konstantinou, 2014). L'allenamento mediante la valutazione degli indici oculari con eye tracking può ridurre il carico cognitivo, portando al miglioramento della concentrazione su elementi importanti da attenzionare. Questa selezione attentiva, maturata attraverso l'esperienza, va a determinare quali bersagli ignorare o considerare, enfatizzando l'importanza dell'apprendimento e dell'adattamento durante la guida.

## **7.6 Conclusione**

Queste ricerche esaminate offrono una panoramica complessiva dell'evoluzione e dell'importanza delle capacità visive e cognitive dei piloti nel contesto degli sport motoristici. L'integrazione di metodologie innovative come il tracciamento oculare e la comprensione dei meccanismi neurocomportamentali forniscono un quadro dettagliato delle strategie visive ottimali e delle capacità percettivo-motorie che distinguono i piloti esperti da quelli principianti. Questi studi hanno sottolineato l'importanza critica dell'attenzione selettiva, della capacità di anticipazione e della gestione efficiente del carico cognitivo per il miglioramento delle prestazioni di guida e della sicurezza in pista. L'introduzione dell'allenamento con l'uso di tecnologie avanzate per l'affinamento delle competenze visive, può adottare strategie per sfruttare l'esperienza come riferimento potenziando l'attenzione il decision Making in ambienti ad alta velocità.

Le implicazioni di queste ricerche si estendono ben oltre il campo sportivo, offrono intuizioni preziose anche per la progettazione di sistemi di addestramento degli automobilisti durante le prime guide per potenziare gli aspetti sulla sicurezza stradale. La capacità di adattare e ottimizzare la raccolta e l'elaborazione delle informazioni visive in condizioni dinamiche può migliorare significativamente la reattività e la sicurezza del conducente, riducendo il rischio di incidenti e migliorando le prestazioni di guida.

Questa raccolta di informazioni e contributi scientifici è proiettata verso una continua esplorazione e integrazione della neuroscienza, della psicologia cognitiva e dell'ingegneria, al fine di sviluppare strategie di formazione efficace e sistemi di assistenza alla guida che possano beneficiare i piloti di vario livello. L'avanzamento della ricerca in questo campo non solo arricchisce la comprensione delle capacità umane in

contesti estremi ma apre anche nuove vie per l'innovazione tecnologica nel settore automobilistico e sportivo.

## **CAPITOLO 8 STUDIO SPERIMENTALE: VALUTAZIONI DEGLI INDICI OCULARI NEL KARTING**

### **Introduzione**

Nel panorama dello sport, si assiste a una vasta gamma di discipline regolate da specifiche Federazioni, le quali si preoccupano di classificarle e regolamentarle, nonché di supervisionare gli atleti affiliati che partecipano a competizioni organizzate o campionati ufficiali. In contesti agonistici, l'attività sportiva è spesso suddivisa in categorie basate sull'età, con particolare attenzione alle fasce giovanili, comunemente designate come "junior". Ad esempio, nel calcio, le squadre giovanili che si avvicinano alla competizione prendono parte a campionati caratterizzati da regolamenti e strutture adattate alle capacità e alle esigenze dei giovani giocatori.

Nel contesto del Motorsport, si riscontra una simile suddivisione disciplinare, con particolare attenzione alle categorie giovanili, le quali sono caratterizzate da veicoli adattati e regolamentati dalle rispettive federazioni che sovrintendono le competizioni (Næss & Næss, 2020). L'aspirazione a diventare pilota di Formula 1 o di Gran Turismo su vetture di serie vede i giovani aspiranti piloti iniziare il proprio percorso attraverso una formula adattata conosciuta come Karting. Tale disciplina, definita dai parametri regolamentari della Federazione Internazionale dell'Automobile (FIA), vede l'utilizzo di Go-Kart, veicoli a quattro ruote motorizzati che, sebbene dotati di tecnologie avanzate, presentano ancora limitazioni strutturali, in quanto privi di sospensioni e ammortizzatori (Das, 2010).

Il Karting, oltre a rappresentare una fase fondamentale nell'ambito del Motorsport, durante la quale giovani piloti acquisiscono competenze di guida e partecipano alle prime competizioni ufficiali, offre anche agli esperti la possibilità di perfezionare le proprie abilità, gestendo traiettorie ad elevate velocità e affinando le tecniche di guida. Il comportamento di guida di questi piloti dipende da fattori tecnici esterni come benzina, temperatura, usura delle gomme etc..., altri fattori non controllabili dipendono da variabili esterne non modificabili che possono incidere sulle prestazioni fisiche e mentali dei piloti mentre svolgono allenamenti o gare (Backman et al., 2005). Uno dei fattori esterni imprevedibili che rendono difficile la conduzione del mezzo in pista è il meteo (es. meteo). In condizioni di pista bagnata il pilota avverte di fronte a delle vere e proprie difficoltà tecniche indotte da fattori esterni che possono causare condizioni particolari che mettono a rischio la loro sicurezza.

Molti piloti scelgono di praticare questo sport consapevoli dei rischi che comporta questa disciplina, anche se la maggior parte di questi rischi sono calcolati e gestibili attraverso fattori controllati. Questa consapevolezza è evidente nei piloti che fanno di questa disciplina la propria professione (Trimpop, Kirkcaldy & Kerr, 1999). Tuttavia, la situazione cambia quando il rischio non è calcolabile e deriva da fattori esterni che possono portare a errori gravi che possono mettere in pericolo anche l'incolumità dei piloti. Queste circostanze sono ardue da valutare e gestire, generando situazioni di pericolo reali dove i piloti di go-kart devono essere particolarmente vigili nel controllarli.

I piloti da sempre sono indagati in termini prestativi su di tempi di reazione, forza, postura e infortuni (Mansfield & Marshall, 2001; Backman et al., 2005; Baur et al., 2006), ma poco è stato fatto rispetto alle loro abilità visive in condizioni rischio per valutare l'impegno cognitivo in condizioni rischio (Owen, King & Lamb, 2015; Potkanowicz & Mendel, 2013; Vetturi et al., 2020). In allenamento la pista bagnata causata da una pioggia improvvisa può impegnare a livello mentale il pilota in quanto è costretto a condurre in maniera anomala il kart. Il kartista è enormemente sollecitato dal punto di vista fisico in quanto è costretto a svolgere molte azioni sui comandi sia in frenata che in curva per mantenere il mezzo in pista senza rischi. Questo impegno fisico comporta uno stress notevole che farebbe pensare a un impegno cognitivo notevole da parte del pilota. L'impegno cognitivo negli automobilisti è stato ampiamente studiato in letteratura grazie

alla strumentazione Eye tracking che permette di mappare lo sguardo e monitorare diversi indici oculari che possono essere correlati con gli indici oculari legati alla fatica del guidatore. Ma per motivi di sicurezza e per questioni legate alla causalità, ad ora non è stato possibile mettere in evidenza contributi con queste ipotesi nel mondo del karting. In occasione di una prova sperimentale è stato possibile sperimentare questa condizione.

Con l'utilizzo dell'Eye tracking Neon della Pupil labs è possibile analizzare alcuni parametri visivi per determinare il carico cognitivo di un pilota agonistico di Go-Kart, in condizioni di pista bagnata. Questo permetterebbe di comprendere meglio come un pilota gestisce l'attenzione visiva in condizioni di rischio. La versatilità di questa tecnologia ampiamente indagata in passato all'interno di setting sperimentali da laboratorio ha permesso oggi di avanzare su setting altamente dinamici con il minimo degli errori sul dataset. Questo permette di confrontare e valutare su un campione più ampio in sedute di allenamento.

I team motoristici si dedicano con impegno alla crescita agonistica degli atleti e all'analisi dei loro progressi nel tempo. Tuttavia, per un team manager individuare il potenziale tecnico di un pilota può rivelarsi una sfida complessa. Gli istruttori e gli ingegneri di pista spesso si basano sui dati telemetrici provenienti dal kart durante le sessioni di allenamento per valutare le prestazioni e individuare aree di miglioramento. La vera sfida consiste nel comunicare in modo efficace al pilota meno esperto gli aspetti su cui concentrarsi per migliorare e sviluppare le proprie abilità.

Numerosi ricercatori hanno esplorato questa relazione, analizzando il processo decisionale, le competenze, il comportamento dello sguardo, i movimenti oculari e il comportamento motorio in diverse discipline sportive (Hüttermann, & Memmert 2018; Silva et al., 2022). Atleti, arbitri e allenatori esperti hanno una abilità superiore di cogliere segnali visivi salienti sul movimento o sulle azioni da compiere in modo preciso ed efficace (Williams et al., 2018). Si ritiene che il comportamento di ricerca visiva degli atleti esperti sia dovuto a conoscenze e strutture di memoria specifiche molto sviluppate (Mann et al., 2007). Pertanto le competenze procedurali acquisite tramite la pratica intensiva svolta in pista, consentono ai tecnici e agli atleti di estrarre quelle informazioni cruciali da poter essere trasmesse ai piloti meno esperti in modo da essere identificati come gli elementi di una buona condotta visiva (Hughes & Franks, 2004). Per i tecnici

dei piloti di go-kart, l'utilizzo di dispositivi mobili e leggeri per il tracciamento oculare potrebbe rappresentare un vantaggio significativo. Questi strumenti sono stati collaudati per fornire una misurazione precisa e non invasiva, permettendo di monitorare al millisecondo dove e per quanto tempo i piloti concentrano la loro attenzione durante le sessioni in pista. Il Neon mostra questa efficacia e potrebbe risolvere il motivo della seconda ipotesi che riguarda la verifica oggettiva di un gruppo di piloti di go kart in base alla loro esperienza pratica. L'idea di trovare delle correlazioni significative su questa ipotesi nasce dal fatto che si è molto dibattuto sull'argomento. La guida ad alta velocità può essere considerata una sorta di "condizione parafisiologica", dove il cervello è sollecitato a elaborare il movimento e le informazioni motorie con rapidità ed esigenza. Risulta interessante notare che numerosi studi condotti su atleti d'élite suggeriscono che l'esperienza di guida, come dimostrato dai piloti professionisti di Formula 1, potrebbe essere correlata a specifici cambiamenti nella morfologia cerebrale (Draganski et al., 2004; Milton et al., 2007; Yarrow et al., 2009; Nakata et al., 2010; Wei et al., 2011). Diversi approfondimenti si sono concentrati sui pattern visivi in contesti dinamici, analizzando la frequenza e la durata degli indici oculari, riscontrando differenze significative rispetto ai piloti meno esperti (Van Leeuwen et al., 2017; Klostermann, A. 2019; Lappi, 2022). dal punto di vista psicologico, dimostrare che esistono differenze visive tra guidatori esperti e non esperti alla guida di un go kart potrebbe rilevare importanti implicazioni per comprendere il trasferimento di alcune abilità. Pertanto, comprendere in che modo i piloti esperti differiscono da quelli non esperti nei compiti di elaborazione visiva di base, potrebbe fornire un collegamento cruciale per comprendere le necessarie abilità visuo-percettive richieste alla guida di questi mezzi, nonché la transizione di guida a una condizione più evoluta per un utilizzo più efficace delle informazioni visive per la navigazione e la gestione del percorso di gara. può riflettere una maggiore competenza ed esperienza nell'ambiente competitivo.

Negli sport motoristici, una serie di fattori meccanici, quali accelerazione, frenata e vibrazioni del veicolo, unitamente a variabili ambientali, come temperatura, equipaggiamento di sicurezza (casco e tuta), può contribuire a generare un graduale affaticamento durante l'attività di guida (Walker et al., 2001). Tuttavia, a causa delle restrizioni in termini di sicurezza e delle limitazioni fisiche, la valutazione di tale

affaticamento risulta essere un compito complesso, e resta ancora scarsa la comprensione delle risposte biologiche dei piloti durante sessioni di allenamento o gare. Come riportato da Beaune & Mariot (2010), studi condotti su giovani piloti di auto da corsa a ruote scoperte hanno evidenziato che durante sessioni di guida della durata di circa 28 minuti, a una velocità media di circa 130 km/h, il consumo energetico (PAR) si attesta tra 4,9 e 5,4 METs. In tali circostanze, la frequenza cardiaca media (FC) risulta essere approssimativamente al 68% della frequenza cardiaca massima.

Ulteriormente, come indicato da Yamakoshi et al. (2010) e Beaune & Durand (2011), l'esperienza di guida del Go-Kart, caratterizzata da sensazioni di "velocità e adrenalina", può portare a valori di frequenza cardiaca che superano i 150 battiti al minuto, rendendo l'attività estenuante e impegnativa, con il rischio concreto di affaticamento che potrebbe influenzare negativamente le capacità del pilota, aumentando il rischio di errori e, di conseguenza, di incidenti e lesioni (Eker et al., 2010). Al fine di mitigare tali rischi, risulta imperativo un monitoraggio accurato delle performance durante l'attività sportiva.

La ricerca di metodi alternativi per valutare la fatica acuta e la stanchezza durante l'allenamento potrebbe contribuire a prevenire situazioni pericolose in pista. L'analisi visiva, attraverso l'identificazione di parametri oggettivi e cluster tra i piloti, potrebbe aiutare a individuare segnali di stanchezza e a introdurre pause adeguate. Nonostante le evidenze fisiologiche sulla valutazione delle performance sportive siano ben consolidate, pochi studi si sono concentrati sull'individuare e monitorare l'incremento della fatica visiva e mentale durante gli allenamenti dei piloti di kart, ad esempio attraverso il diametro pupillare e il comportamento degli ammiccamenti. Questo parametro, ampiamente studiato in letteratura in altre discipline sportive (Loiseau-Taupin et al., 2021; Asadi, et al., 2022), potrebbe generare un crescente interesse nel mondo del karting. Per questo motivo la terza ipotesi mostra una scelta efficace per capire e dare valore oggettivo all'affaticamento mentale di un pilota di Go-kart. In questo caso lo studio si propone di utilizzare l'Eye tracking Neon della Pupil labs per analizzare i parametri visivi come ricerca di metodi alternativi per valutare la fatica acuta e la stanchezza, visiva correlata alla prestazione tramite parametri oggettivi sul tracciamento oculare misurati.

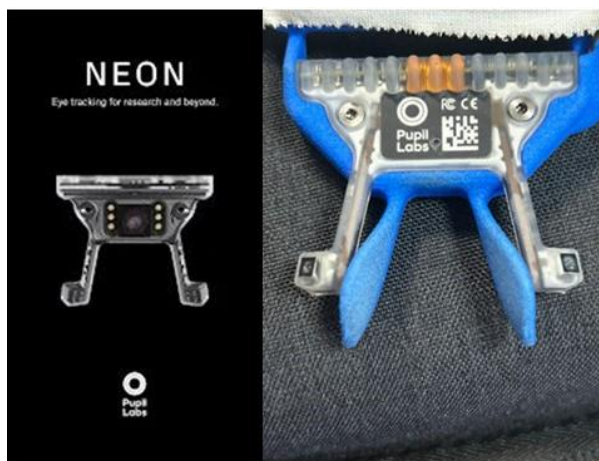
## 8.1 Obiettivo dello studio (1) valutazione dello sguardo di un pilota di Go kart in condizioni di pista bagnata: una prova sperimentale con l'eye Tracker Neon della pupil labs.

Il primo obiettivo dello studio mira a valutare l'efficacia dell'Eye tracker Neon (Pupil labs) come strumento di indagine per confrontare i parametri visivi di un pilota di kart durante una sessione di allenamento su pista in condizioni di asciutto e bagnata. L'ipotesi volta esaminare la capacità dell'Eye tracker Neon di rilevare e analizzare i movimenti oculari del pilota durante l'esecuzione di round di allenamento. L'obiettivo è comprendere come le condizioni della pista (asciutta o bagnata) possano influenzare la performance visiva del pilota e se l'Eye tracker Neon possa fornire dati affidabili e utili per tale valutazione. Per conseguire questi obiettivi è stato coinvolto un pilota esperto di Go-kart partecipante al Campionato italiano, previa acquisizione del consenso informato.

### 8.1.2 Materiali e metodi

#### *Strumenti*

Il presente studio è stato condotto presso il Kartodromo Internazionale di Aprilia (LT) impiegando l'Eye Tracker Neon, prodotto dalla società tedesca Pupil Labs, per il monitoraggio oculare del pilota durante le sessioni di addestramento (**fig2**).



L'Eye Tracker Neon si distingue per la sua capacità di mantenere un tracciamento oculare stabile anche durante attività dinamiche come la guida in pista ad alta velocità.

Il dispositivo consiste in un piccolo hardware montato su una fascia indossabile dotato di una telecamera ad ampia angolazione che registra un campo visivo estremamente ampio ( $132^{\circ} \times 81^{\circ}$ ) con una risoluzione di 1600 x 1200 px. Due telecamere oculari, una per ciascun occhio, posizionate in prossimità del naso per garantire la massima visibilità degli occhi e ridurre le occlusioni durante le attività.

Una caratteristica distintiva del Neon è la sua capacità di tracciare i movimenti oculari utilizzando il deep learning, il che consente un tracciamento preciso e affidabile senza la necessità di calibrazione. Inoltre, il dispositivo è dotato di microfoni stereo integrati per acquisire informazioni audio durante le sessioni.

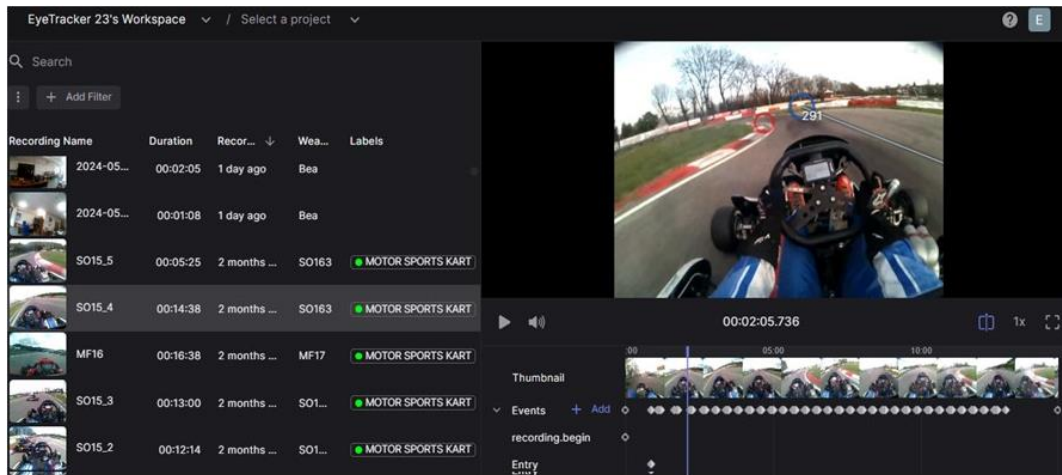
Oltre a fornire automaticamente le fissazioni e il numero di ammiccamenti frame by frame, il Neon è in grado anche di elaborare i dati dell'occhio per stimare una visualizzazione in 2D e 3D dello sguardo su ciò che viene guardato esternamente. È in grado anche di registrare l'orientamento degli occhi rispetto all'asse ottico del bulbo oculare e la posizione di ciascun occhio, con la possibilità di calcolare con estrema precisione il diametro fisico della pupilla per ciascun occhio.

Infine, il dispositivo è integrato con un sensore IMU che traccia i movimenti della testa a 110 Hz e stima la sua posizione assoluta in condizioni di beccheggio, rollio e imbardata. La versatilità del Neon deriva dalla sua capacità di essere utilizzato in una varietà di condizioni, sia in laboratorio in completa oscurità che in ambienti esterni sotto la luce solare. È progettato per adattarsi a una vasta gamma di caratteristiche fisiche degli individui, come il colore degli occhi, della pelle, la geometria del viso, il trucco degli occhi e l'uso di lenti a contatto.

#### *Il software Pupil cloud*

I dati dall'Eye tracker Pupil Neon vengono immagazzinati in un cloud prima di essere processati. Il cloud offre una vasta gamma di strumenti per automatizzare l'analisi dello sguardo tramite tools open dedicati alle analisi dello sguardo dai video registrati. Al suo interno è possibile aggregare ed esplorare in modo flessibile i dati utilizzando alcuni strumenti di elaborazione per generare mappe e (AOI) rappresentative dello sguardo. Tramite questo software gratuito è possibile sincronizzare tutti i dati mediante un timestamp per configurare altri biosensori e altri flussi dati. Il software è compatibile con tutte le librerie python deputate al tracciamento oculare. In aggiunta tutti i dati sono disponibili in un unico account. Consentendo di scaricare facilmente le informazioni mantenendo il pieno controllo della privacy. Pupil Cloud offre strumenti per mappare manualmente lo sguardo in un ambiente reale. Questo studio ha impiegato il supporto del Pupil Cloud, un servizio basato su cloud che offre una vasta gamma di strumenti per automatizzare l'analisi dello sguardo utilizzando i dati raccolti dall'Eye tracker Pupil

Neon. Il Pupil Cloud fornisce un ambiente flessibile per l'elaborazione e l'analisi dei dati tramite un software open source, consentendo di esplorare e aggregare i dati in modo efficace (**fig 3**).



All'interno del Pupil Cloud, è possibile utilizzare strumenti di elaborazione dati per generare mappe dello sguardo, fornendo una panoramica dettagliata dei movimenti oculari registrati durante le sessioni di guida sul kartodromo. Il software gratuito disponibile nel Pupil Cloud consente di sincronizzare i dati attraverso timestamp, facilitando l'integrazione con altri biosensori e flussi di dati per una comprensione più approfondita delle prestazioni del pilota.

Un vantaggio significativo del Pupil Cloud è la sua compatibilità con tutte le librerie Python dedicate al tracciamento oculare, offrendo agli utenti una flessibilità e una personalizzazione maggiori nella gestione e nell'analisi dei dati raccolti. Inoltre, tutti i dati sono accessibili tramite un singolo account, consentendo un facile accesso e il pieno controllo della privacy.

Un'altra caratteristica utile del Pupil Cloud è la possibilità di mappare manualmente lo sguardo in un ambiente reale. Ciò consente agli utenti di annotare e analizzare specifici punti di interesse nello scenario di guida, arricchendo ulteriormente l'analisi dei movimenti oculari durante le sessioni di allenamento sul kartodromo.

In sintesi, il Pupil Cloud rappresenta un'importante risorsa per l'analisi dei dati raccolti dall'Eye tracker Pupil Neon, offrendo strumenti potenti e flessibili per esplorare, elaborare e interpretare i dati relativi alla performance visiva del pilota durante le sessioni di guida.

### 8.1.3 Procedura:

Per valutare l'affidabilità dello strumento in contesti altamente dinamici e comprendere il carico cognitivo del pilota di go-kart su varie condizioni di pista, abbiamo condotto una sessione di allenamento di 10 minuti, equivalente a 6 giri, presso il kartodromo di Aprilia. Lo studio è stato condotto su un singolo pilota che nel corso di questi sei giri ha affrontato due diverse condizioni di pista.

Per registrare l'attività oculare, il pilota ha indossato l'Eye tracker Neon, montato sotto



il casco (**fig.4**). Il dispositivo era connesso a un telefono OnePlus, trasportato dal pilota sotto la tuta, in una custodia porta-telefono trasparente fissata sopra il paracostole. Il telefono ha eseguito l'applicazione Pupil Companion per catturare video in prima persona delle prestazioni del pilota durante i giri. La registrazione dei dati è stata

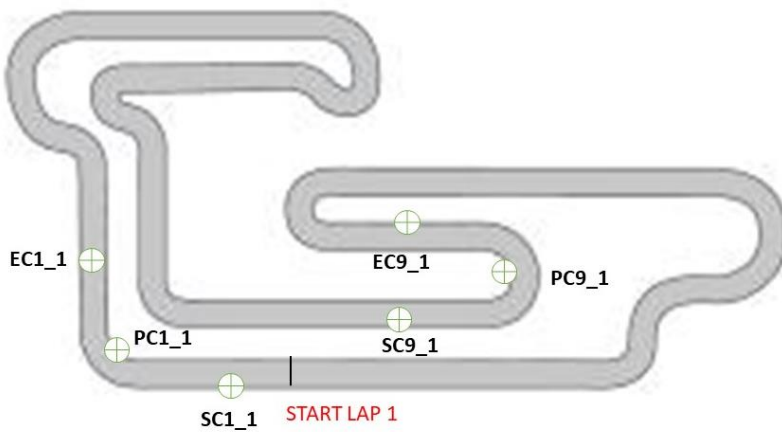
avviata all'inizio del primo giro e terminata al completamento dell'ultimo, prima di rimuovere la strumentazione.

I dati raccolti sono stati successivamente caricati su Pupil Cloud, una piattaforma software open source, per l'analisi. Tramite questo strumento sono stati identificati i pattern visivi del pilota e sono state estratte variabili critiche per confrontare le diverse condizioni di pista. Dal dataset ottenuto, sono stati analizzati diversi parametri oculari, inclusi i timestamp dei video (in nanosecondi) con riferimenti agli eventi di ciascun giro e curva, il numero e la durata delle fissazioni (in millisecondi), il numero e la durata dei movimenti saccadici (in millisecondi), il diametro delle pupille dell'occhio sinistro e destro, e il numero e la durata degli ammiccamenti.

In questo contesto, una visione ottimale per un pilota di go-kart non implica necessariamente una buona acuità visiva, ma piuttosto la capacità di cogliere quante più

informazioni possibili dal circuito. La maggior parte delle decisioni di guida del pilota sono basate sulle percezioni visive della pista. Di conseguenza, è essenziale riconoscere se un pilota possiede una vista efficace per la guida, specialmente in situazioni che richiedono azioni correttive anticipate in risposta a cambiamenti improvvisi delle condizioni della pista o del veicolo.

Per una precisa identificazione dei momenti critici nei giri, sono stati utilizzati dei tag sul timestamp della registrazione video per evidenziare i momenti significativi di ingresso e uscita dalla curva per ciascun giro, come indicato in (fig.3). I tag sono stati denominati



SC1(x) per l'inizio della curva 1 del giro x, PC1(x) per il punto tangente del cordolo interno o punto di corda della curva 1 del giro x, e EC1(x) per l'uscita dalla curva 1 del giro x. Stessa procedura è stata eseguita per analizzare anche la curva 9. Una volta inseriti i tag è stato possibile sincronizzare il file

EVENTS(Eventi) al file CSV della registrazione video. Con questa procedura è stato possibile costruire i momenti di ingresso e uscita delle curve. Questa sincronizzazione ha permesso di estrapolare 59 variabili di interesse: Tempo Giro (s); Velocità Media per Giro (Km/h); Numero Fissazioni; Durata media Fissazioni; Numero Blinks; Media durata Blinks; Numero Saccadi; Media durata Saccadi; Diametro Medio Pupilla; Tempo Ingresso Curva 1 (s); Tempo Uscita Curva 1 (s); Numero Fissazioni Ingresso Curva 1; Durata Media Fissazioni Ingresso Curva 1; Fissazione Più Lunga Ingresso Curva 1; Numero Fissazioni Uscita Curva 1; Durata Media Fissazioni Uscita Curva 1; Fissazione Più Lunga Uscita Curva 1; Numero Blinks Ingresso Curva 1; Durata Media Blinks Ingresso Curva 1; Numero Blinks Uscita Curva 1; Durata Media Blinks Uscita Curva 1; Numero Saccadi Ingresso Curva 1; Durata Media Saccadi Ingresso Curva 1; Numero Saccadi Uscita Curva 1; Durata Media Saccadi Uscita Curva 1; Diametro Medio Pupilla

Ingresso Curva 1 (mm); Diametro Medio Pupilla Uscita Curva 1 (mm); Tempo Ingresso Curva 9 (s); Tempo Uscita Curva 9 (s); Numero Fissazioni Ingresso Curva 9; Durata Media Fissazioni Ingresso Curva 9; Fissazione Più Lunga Ingresso Curva 9; Numero Fissazioni Uscita Curva 9; Durata Media Fissazioni Uscita Curva 9; Fissazione Più Lunga Uscita Curva 9; Numero Blinks Ingresso Curva 9; Durata Media Blinks Ingresso Curva 9; Numero Blinks Uscita Curva 9; Durata Media Blinks Uscita Curva 9; Numero Saccadi Ingresso Curva 9; Durata Media Saccadi Ingresso Curva 9; Numero Saccadi Uscita Curva 9; Durata Media Saccadi Uscita Curva 9; Diametro Medio Pupilla Ingresso Curva 9 (mm); Diametro Medio Pupilla Uscita Curva 9 (mm); Tempo Settore 1 (s); Numero Fissazioni Settore 1; Durata Media Fissazioni Settore 1 (ms); Numero Blinks Settore 1; Durata Media Blinks Settore 1 (ms); Numero Saccadi Settore 1; Durata Media Saccadi Settore 1 (ms); Diametro Medio Pupilla Settore 1 (mm); Gyro X Medio Settore 1 (deg/s); Gyro Y Medio Settore 1 (deg/s); Gyro Z Medio Settore 1 (deg/s); Accelerazione X Media Settore 1 (G); Accelerazione Y Media Settore 1 (G); Accelerazione Z Media Settore 1 (G). Attraverso l'utilizzo del software Python, è stato possibile ottenere le variabili di riferimento per ogni pilota analizzato. Questo processo ha consentito la creazione di dataset necessari per le analisi statistiche condotte nel contesto della ricerca.

#### **8.1.4 Analisi statistiche condizione asciutto/bagnato**

Per l'analisi delle variabili estrapolate sulle condizioni asciutto bagnato, abbiamo impiegato il software IBM Statistical Package for Social Sciences (SPSS), versione 26, per condurre analisi multivariate e di regressione, con lo scopo di esaminare in dettaglio l'impatto delle condizioni della pista sui parametri oculari durante le sessioni di allenamento di un solo pilota. Con il calcolo delle statistiche descrittive, come media, deviazione standard, e i valori minimi e massimi per ogni variabile rilevata, è stato possibile analizzare la variabilità e il comportamento medio degli indici oculari nelle 2 diverse condizioni atmosferiche. È stato eseguito un test *t* di Student per misure ripetute per indagare le differenze tra le condizioni asciutte e bagnate, ed identificare le differenze significative tra le medie delle coordinate dello sguardo per determinare l'orientamento dello sguardo. Inoltre, sono state condotte analisi dei movimenti oculari, con le fissazioni e le saccadi, per esplorare le varie differenze visive, includendo sia la frequenza che la

durata, permettendo di osservare come l'attenzione e le strategie visive del pilota variassero in risposta alle condizioni ambientali. Un'analisi particolare è stata dedicata alla frequenza degli ammiccamenti, utilizzando sia il test del Chi-quadrato che il test t di Student, per valutare le differenze potenziali nel livello di stress o fatica visiva tra le 2 condizioni. Il livello di significatività statistica di  $p < 0.05$  ha confermato che le differenze osservate nelle prestazioni di guida sono statisticamente significative. Queste analisi hanno offerto una comprensione approfondita di come le condizioni della pista influenzano le prestazioni visive e cognitive del pilota. Queste sono le dichiarazioni delle analisi effettuate nello studio.

### 8.1.5 Risultati

#### *Analisi spaziale dello sguardo*

I risultati hanno mostrato variazioni significative sulla condotta visiva, le condizioni atmosferiche influenzano sensibilmente il comportamento visivo del pilota. Da una prima analisi sull'orientamento dello sguardo del pilota sono state individuate alcune differenze sull'orientamento dello sguardo in pista in base alle due condizioni analizzate.

Nella (tabella 2) viene fornita un'analisi del comportamento dello sguardo durante la guida in condizioni asciutte e bagnate, indicando le posizioni media dello sguardo sulla scena, nonché la variabilità dell'orientamento dello sguardo durante la guida del kart su asciutto e bagnato.

*(Tabella 2) variabilità dello sguardo durante la guida del kart su asciutto e bagnato*

<b>Gaze x e y (pista asciutta)</b>	<b>Gaze x [px]:</b>	<b>Gaze y [px]:</b>	<b>Azimuth [deg]:</b>	<b>Elevation [deg]:</b>
Media:	843.34 px	476.89 px	2.82°	9.11°
Deviazione standard:	133.93 px	120.29 px	8.73°	7.69°
Minimo:	171.68 px	92.17 px	-40.90°	-26.17°
Massimo:	1540.23 px	1028.53 px	48.99°	33.63°
<b>Gaze x e y (pista bagnata)</b>	<b>Gaze x [px]:</b>	<b>Gaze y [px]:</b>	<b>Azimuth [deg]:</b>	<b>Elevation [deg]:</b>
Media:	828.14 px	499.80 px	1.83°	7.63°
Deviazione standard:	154.38 px	130.70 px	10.04°	8.35°
Minimo:	58.49 px	65.78 px	-48.21°	-28.11°
Massimo:	1513.00 px	1076.79 px	46.70°	35.12°

Confrontando i dati, possiamo notare alcune differenze nelle medie e nella variabilità di posizione e orientamento del comportamento visivo del pilota. Dai dati analizzati è

possibile determinare le coordinate dello sguardo sul piano visivo del pilota rispetto alla camera di scena. Dall'analisi è emerso che la media della coordinata y dello sguardo è leggermente superiore in condizioni bagnate, il che indica un diverso approccio visivo sulla pista. L'azimut riferito alle variazioni in gradi dello sguardo sul piano orizzontale medio è più basso in condizioni bagnate, indicando un cambiamento nell'orientamento dello sguardo. Le differenze sono risultate statisticamente significative; è stato effettuato un test t di Student per misure ripetute per confrontare le medie delle posizioni dello sguardo e dell'orientamento tra le due condizioni. I risultati hanno indicato che ci sono differenze statisticamente significative tra le 2 condizioni per tutte le variabili testate. Il valore p è estremamente basso ( $p < 0.05$ ) per ogni confronto, suggerendo che le differenze osservate nelle medie delle posizioni dello sguardo (gaze x & gaze y), nonché nell'azimut e nell'elevazione, non sono dovute al caso. (tabella3).

(Tabella 3) *significatività dei valori IMU per le condizioni asciutto bagnato*

<b>Variabile</b>	<b>Statistic (t)</b>	<b>Valore (p)</b>
<b>gaze x [px]</b>	24.93	0.00
<b>gaze y [px]</b>	-42.80	0.00
<b>azimuth [deg]</b>	24.87	0.00
<b>elevation [deg]</b>	43.15	0.00

Nello specifico la coordinata x dello sguardo è significativamente diversa, con una media maggiore in condizioni asciutte ( $t = 24.99$   $p = 0.00$ ), mentre la coordinata y dello sguardo mostra una media significativamente maggiore in condizioni bagnate, indicando che il pilota tende a guardare più in alto sulla pista quando è bagnata ( $t = -42.80$   $p = 0.00$ ). L'azimut medio è significativamente diverso, suggerendo un cambiamento nell'orientamento dello sguardo tra le due condizioni ( $t = 24.87$   $p = 0.00$ ). L'elevazione media è significativamente diversa, in quanto il pilota tende ad avere uno sguardo più basso in condizioni asciutte rispetto al bagnato. Queste ultime considerazioni rispettano le condizioni normali di visione in pista di un pilota di kart esperto; in condizioni asciutte il pilota assume uno sguardo basso e concentrato sulla traiettoria da seguire, mentre è diverso quando il pilota gira sul bagnato il che lo vede costretto ad anticipare e ad alzare lo sguardo in vista di imminenti pericoli presenti in traiettoria.

Nella tabella (4) sono riportate le medie delle coordinate **x** e **y** dello sguardo, dove è stato possibile notare come l'azimuth ed elevation variano tra le due condizioni asciutte (Dry) e bagnate (Wet).

(Tabella 4) *medie delle coordinate x e y dello sguardo nelle due condizioni*

<b>Gaze</b>	<b>Gaze x (Dry)</b>	<b>Gaze y (Dry)</b>	<b>Azimuth (Dry)</b>	<b>Elevation (Dry)</b>	<b>Gaze x (Wet)</b>	<b>Gaze y (Wet)</b>	<b>Azimuth (Wet)</b>	<b>Elevation (Wet)</b>
<b>Count</b>	158487	158487	158487	158487	80968	80968	80968	80968
<b>Mean</b>	843.34	476.89	2.82	9.11	828.14	499.80	1.83	7.63
<b>Std</b>	133.93	120.29	8.73	7.69	154.38	130.70	10.04	8.35
<b>Min</b>	171.68	92.17	-40.90	-26.17	58.49	65.78	-48.21	-28.11
<b>25%</b>	765.45	403.58	-2.26	6.99	751.06	420.83	-3.20	5.18
<b>50%</b>	841.61	456.21	2.71	10.43	818.86	465.28	1.22	9.85
<b>75%</b>	912.11	509.90	7.31	13.81	901.48	537.78	6.61	12.70
<b>Max</b>	1540.23	1028.53	48.99	33.63	1513.00	1076.79	46.70	35.12

*comportamento visivo:*

Un'ulteriore verifica è stata condotta per esaminare le differenze nel comportamento dei movimenti oculari del pilota nelle due condizioni. Si sono confrontati i pattern visivi riguardanti le fissazioni e le saccadi durante l'allenamento, sia in condizioni asciutte che bagnate, al fine di individuare differenze o potenziali strategie visive adottate. In aggiunta, è stata condotta un'analisi ulteriore per identificare eventuali correlazioni con la frequenza dei battiti delle ciglia, al fine di valutare se la frequenza di ammiccamento varia con le condizioni della pista e se può essere indice di stress o fatica. La durata media delle fissazioni è simile tra le condizioni asciutte e bagnate, il che implica che la condizione della pista non influenza la durata delle fissazioni, nonostante sia stata osservata una leggera differenza nelle posizioni medie (x, y) delle fissazioni (vedi tabella 5).

(Tabella 5) *Durata media delle fissazioni nelle due condizioni asciutte e bagnate*

<b>Fissazioni</b>	<b>Durata (ms) (Dry)</b>	<b>Fixation x (Dry)</b>	<b>Fixation y (Dry)</b>	<b>Durata (ms) (Wet)</b>	<b>Fixation x (Wet)</b>	<b>Fixation y (Wet)</b>
<b>Count</b>	1687	1687	1687	897	897	897
<b>Mean</b>	400.77	850.29	485.65	398.10	832.89	513.69
<b>Std</b>	614.95	142.06	126.75	378.32	168.48	139.53
<b>Min</b>	68.00	231.65	179.78	68.00	154.96	79.13
<b>0,25</b>	150.00	770.66	407.89	184.00	742.85	429.26

<b>0,5</b>	240.00	852.92	455.31	281.00	818.55	472.69
<b>0,75</b>	468.00	923.57	517.34	465.00	916.97	544.86
<b>Max</b>	19437.00	1513.07	973.66	3787.00	1475.07	1047.17

La durata media dei movimenti saccadici è maggiore su pista bagnata, mentre i movimenti oculari rapidi risultano essere molto più prolungati su pista normale; nella (tabella 6) vengono evidenziati i valori di ampiezza media delle saccadi che risultano essere maggiori in condizioni bagnate. Questi risultati indicano che i movimenti oculari possono coprire un campo visivo più ampio in queste condizioni. Questi valori riflettono una ricerca visiva più estesa e una maggiore necessità di raccogliere informazioni dall'ambiente circostante. A contrario da quanto dichiarato da (Van Orden et al., 2001), dove è stato riscontrato che l'ampiezza diminuisce all'aumentare del carico di lavoro compiti di guida simulata (Underwood et al., 2002). In questo caso all'interno delle attività di ricerca è stato riscontrato che le ampiezze saccadiche medie più piccole indicano inefficienza di ricerca visiva (Goldberg and Kotval, 1999) e possono indicare una maggiore difficoltà di ricerca (Zelinsky & Sheinberg, 1997). Tuttavia, ampiezze maggiori delle saccadi potrebbero semplicemente indicare che viene attirata meglio l'attenzione (Goldberg et al., 2002; Inamdar and Pomplun, 2003).

(Tabella 6) *valori di ampiezza media delle saccadi asciutto/bagnato*

<b>Saccadi</b>	<b>Durata (ms)</b>	<b>Amplitude (°)</b>	<b>Durata (ms)</b>	<b>Amplitude (°)</b>
	<b>Asciutto</b>	<b>Asciutto</b>	<b>Bagnato</b>	<b>Bagnato</b>
<b>Count</b>	1687	1687	897	897
<b>Mean</b>	68.91	10.14	53.30	11.54
<b>Std</b>	63.91	10.01	41.75	10.04
<b>Min</b>	6.00	0.10	9.00	0.80
<b>25%</b>	28.00	3.32	31.00	4.34
<b>50%</b>	43.00	6.05	40.00	8.31
<b>75%</b>	90.00	14.03	59.00	14.73
<b>Max</b>	521.00	68.83	515.00	66.76

Per valutare la frequenza dei Blinks e determinare se esistono differenze significative che possano indicare livelli di stress o fatica tra le due condizioni, sono stati analizzati i (blinks) del pilota sia in condizioni asciutte che bagnate.

I risultati dell'analisi degli ammiccamenti sono stati riportati nella (tabella 7):

(tabella 7) medie numero e durata degli ammiccamenti asciutto/bagnato

<b>Condizione</b>	<b>(Blinks)</b>	<b>Durata Media Blinks (ms)</b>
<b>Asciutto</b>	247	151.71
<b>Bagnato</b>	56	182.36

L'analisi dei risultati suggerisce che il pilota ha manifestato un maggior numero di ammiccamenti durante la guida in condizioni di pista asciutta. Questo potrebbe essere attribuito all'impegno richiesto dal carico percettivo rispetto a un impegno cognitivo specifico. Questa ipotesi è supportata da studi precedenti, come quello di Recarte et al. (2008), che indicano una relazione inversa tra il carico cognitivo e la frequenza degli ammiccamenti.

La relazione tra carico cognitivo e durata degli ammiccamenti è stata ampiamente dibattuta in letteratura, specialmente in contesti di attività di memoria e identificazione di obiettivi. Alcuni studi hanno mostrato che la durata degli ammiccamenti diminuisce all'aumentare del carico di lavoro e con una maggiore densità di obiettivi (Van Orden et al., 2001). Questa ipotesi è confermata da evidenze precedenti, come quelle ottenute da Veltman e Gaillard (1996) in studi di guida simulata, dove si è osservato che all'aumentare del carico di lavoro diminuiva la durata degli ammiccamenti.

Tuttavia, esistono prove contrastanti che suggeriscono un aumento della durata degli ammiccamenti in risposta a un carico cognitivo più elevato (Pedrotti et al., 2011). Pedrotti e colleghi hanno rilevato che l'interazione con i sistemi informativi del veicolo abbrevia la durata degli ammiccamenti, ma che questa aumenta con il tempo trascorso alla guida. Questo potrebbe indicare che, in condizioni di bagnato, il pilota potrebbe chiudere le palpebre per periodi più lunghi, come risposta a una maggiore fatica o stress derivanti dalle condizioni di guida impegnative.

I test statistici confermano una differenza significativa nella frequenza totale dei Blinks tra le condizioni asciutte e bagnate, come dimostrato dal valore  $p$  estremamente basso nel test del Chi-quadrato. Inoltre, la durata media dei lampeggi mostra differenze statisticamente significative tra le due condizioni, confermate sia dal *test t di Student* sia

dal *test di Mann-Whitney U*. Questi risultati suggeriscono che le differenze osservate nei comportamenti degli ammiccamenti non sono casuali (tabella8).

(Tabella 8) *significatività differenze frequenza Blinks asciutto bagnato*

Test		$p < 0.05$
<b>Test del Chi-quadrato</b>	$\chi^2: 171.84$	$p 0.00$
<b>Test t di Student</b>	t: -3.96	$p 0.00$
<b>Test di Mann-Whitney U</b>	U: 5371.0	$p 0.01$

In conclusione, le condizioni asciutte e bagnate influenzano significativamente sia la frequenza degli ammiccamenti sia la loro durata media, riflettendo potenzialmente differenti livelli di stress, fatica o esigenze di adattamento visivo del pilota nelle diverse condizioni di guida.

## **8.2 Obiettivo dello studio (2) valutazione degli indici dello sguardo in base all'esperienza su 20 piloti di Go kart.**

### **8.2.1 Procedura**

Il secondo obiettivo della ricerca è volto a valutare l'efficacia dell'Eye Tracker Neon, prodotto da Pupil Labs, come strumento per investigare l'esperienza visiva durante sessioni di allenamento su pista asciutta, confrontando i parametri visivi tra piloti esperti e non esperti. L'ipotesi si concentra sulla capacità dell'Eye Tracker Neon di rilevare e analizzare i movimenti oculari dei piloti durante le sessioni di allenamento, al fine di identificare eventuali differenze tra esperti e non esperti e comprendere i pattern distintivi basati sull'esperienza agonistica. Questa analisi mira a individuare cluster specifici che possano differenziare obiettivamente i due gruppi di piloti e analizzare il loro comportamento in determinati settori. Per raggiungere tali obiettivi, è stato coinvolto un campione di 20 piloti agonisti, rappresentanti diverse fasce di età e livelli di esperienza.

Per l'analisi delle disparità tra piloti esperti e non esperti, venti partecipanti anonimi e volontari del campionato italiano di Go-kart sono stati reclutati per sessioni di allenamento della durata di 10 minuti, durante le quali hanno utilizzato l'Eye Tracker Pupil Neon. Le prove si sono concentrate sui primi 5 giri del Kartodromo Internazionale

di Arce, mentre la differenziazione tra i due gruppi è stata basata su una mediana calcolata sulla variabile dell'esperienza, che ha mostrato un valore di 5,5 anni.

Al fine di registrare l'attività oculare, i piloti hanno indossato l'Eye Tracker Neon montato sotto il casco, il quale era connesso a un telefono OnePlus per la registrazione dei dati. I dati raccolti sono stati successivamente sottoposti ad analisi, con particolare attenzione ai parametri quali fissazioni, saccadi, blink e diametro pupillare, al fine di identificare i pattern visivi distintivi tra piloti esperti e non esperti in varie zone della pista.

Per una precisa identificazione dei punti significativi, sono stati utilizzati tag temporali sui timestamp della registrazione video, al fine di evidenziare gli ingressi e le uscite dalla curva 1 e dalla curva 9 per ciascun giro. La sincronizzazione di tali tag con i file CSV generati dalla registrazione video ha permesso la costruzione dei momenti di ingresso e uscita delle curve. Tale sincronizzazione ha consentito di identificare le variabili di confronto, che comprendono il tempo di percorrenza in secondi, la velocità in chilometri orari, il numero e la durata delle fissazioni, dei blink e dei movimenti saccadici, nonché il diametro medio delle pupille, sia per i singoli giri che per le singole curve. Ulteriori dati, quali il tempo di percorrenza di un settore di pista, unitamente a tutte le altre variabili degli indici oculari, sono stati acquisiti, includendo anche misurazioni IMU per analizzare movimenti della testa in un preciso settore di pista.

### **8.2.2 Analisi statistiche analisi expertise tra piloti**

Nel corso della ricerca effettuata su un campione di 20 piloti, sono state implementate metodologie statistiche avanzate per analizzare le variazioni comportamentali visive e di performance tra piloti esperti e meno esperti in specifici contesti di guida. Le principali misurazioni hanno riguardato il numero e la durata delle fissazioni, delle saccadi, dei blink, nonché il diametro pupillare, ottenuti attraverso l'utilizzo del Neon della Pupil Labs.

Le medie relative al numero e alla durata delle fissazioni per ciascun pilota sono state sottoposte a test t di Student e analisi di varianza (ANOVA) per identificare significative differenze tra i gruppi in vari segmenti del percorso. Queste analisi hanno permesso di

quantificare come la capacità visiva e di concentrazione vari in funzione dell'esperienza di guida.

L'indagine sulle saccadi ha seguito una metodologia analoga, valutando le medie del numero e della durata attraverso il test  $t$  di Student per confrontare i gruppi di piloti in base al loro livello di esperienza, allo scopo di comprendere l'influenza dell'esperienza sulla dinamica dei movimenti oculari rapidi.

Per quanto concerne l'analisi dei blink, è stata esaminata la frequenza e la durata di questi eventi durante i vari giri, allo scopo di identificare possibili correlazioni con la fatica o la gestione dello stress in situazioni di guida ad alta velocità.

In aggiunta, il diametro pupillare è stato esaminato come indicatore del carico cognitivo e dello stress, analizzando le differenze medie tra piloti esperti e meno esperti.

Attraverso l'impiego di regressioni lineari, sono state esplorate le relazioni tra le variabili oculari e le prestazioni di guida, quali velocità e tempo per giro, per determinare l'impatto delle competenze visive sulla performance in pista.

In sintesi, queste metodologie statistiche complesse hanno fornito un'analisi dettagliata delle dinamiche visive e cognitive dei piloti durante la guida, evidenziando in che modo l'esperienza influenzi l'efficacia nella gestione delle informazioni visive e le prestazioni in contesti di guida competitivi. Questi risultati contribuiranno significativamente al corpo della tesi, offrendo spunti cruciali sulle interazioni tra capacità visive e abilità di guida.

### **8.2.3 Differenze Giro Pista Esperti/ non esperti.**

Durante le prove i piloti di go kart sono stati valutati sui primi 5 giri di pista. Nella sessione di allenamento i primi giri sono indicati per riscaldare le gomme mentre dal primo giro fino al 5 i piloti tendono a spingere il kart per poter fare il tempo migliore andando più veloce. per osservare le differenze tra esperti e non esperti abbiamo misurato 20 piloti tutti con caratteristiche differenti tra loro. Sono stati presi tempi e velocità medie per ogni giro e misurati indici oculari come: Fissazioni, saccadi, blinks, e diametro

pupillare per ogni pilota tramite l'eye tracker pupil Neon. La tabella 9 mostra le statistiche descrittive specifiche del campione analizzato.

(Tabella 9) *Caratteristiche del campione in base all'esperienza*

<b>caratteristiche piloti</b>	<b>Numero</b>	<b>Media</b>	<b>SD</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Età	20	19.35	6.15	12.00	40.00
Anni di pratica	20	6.25	4.01	1.00	12.00
esperienza	20	1.50	0.51	1.00	2.00

### *Fissazioni*

Le medie delle fissazioni totali tra i piloti di esperienza bassa: ( $\leq 5$  anni) è di 722.9 fissazioni; mentre per i piloti con un'esperienza il livello alto ( $> 5$  anni) è di di 616.2 fissazioni. Anche la durata varia tra i 342.46 ms per i non esperti e 449.02 ms per gli esperti (tabella 10).

(Tabella 10) *media sul numero e durata delle fissazioni Totale /esperti /non esperti*

### **Media Totale**

<b>Giro</b>	<b>Media Numero Fissazioni</b>	<b>Media Durata Fissazioni (ms)</b>
0	127.95	404.40
1	110.85	406.67
2	111.30	395.89
3	106.80	390.35
4	107.50	387.92
5	105.15	389.21

### **Media Non Esperti**

<b>Giro</b>	<b>Media Numero Fissazioni</b>	<b>Media Durata Fissazioni (ms)</b>
0	132.20	357.14
1	121.50	354.71
2	114.80	349.02
3	118.30	331.93
4	121.10	327.73

5	115.00	334.25
---	--------	--------

### Media Esperti

Giro	Media Numero Fissazioni	Media Durata Fissazioni (ms)
0	123.70	451.66
1	100.20	458.63
2	107.80	442.75
3	95.30	448.78
4	93.90	448.11
5	95.30	444.18

Il test t di Student ha rivelato un valore t di -2.23 e una  $p$  approssimativamente pari a 0.038, indicando una significativa differenza nelle durate medie delle fissazioni tra i due gruppi di esperienza, con un livello di confidenza del 95% ( $p < 0.05$ ). In particolare, la media delle fissazioni per i piloti esperti è stata di circa 102.7, mentre per i non esperti è stata di 120.5. L'ANOVA ha confermato una differenza statisticamente significativa tra i due gruppi, con un  $p$ -value di 0.0000362, suggerendo una disparità significativa nel numero di fissazioni.

Successivamente, un'analisi sui giri ha evidenziato delle differenze significative, specialmente nei giri 3, 4 e 5, sia nel numero che nella durata delle fissazioni, suggerendo una relazione più marcata durante l'allenamento in questi specifici giri.

(Tabella 11) ANOVA differenze statistiche sul numero e durata delle fissazioni per giro

Giro	F-stat (Fissazioni)	p (<0.05)	F-stat (Durata fissazioni)	p (<0.05)
0	0.69	0.416	2.67	0.119
1	5.49	0.031	3.50	0.078
2	0.25	0.622	3.96	0.062
<b>3</b>	<b>7.48</b>	<b>0.014*</b>	<b>6.46</b>	<b>0.020*</b>
<b>4</b>	<b>9.70</b>	<b>0.006*</b>	<b>5.78</b>	<b>0.027*</b>
<b>5</b>	<b>7.68</b>	<b>0.013*</b>	<b>5.37</b>	<b>0.032*</b>

Nella tabella 11 i risultati indicano le differenze statisticamente significative tra esperti e non esperti nei giri 1, 3, 4 e 5 per quanto riguarda sia il numero sia la durata media delle fissazioni.

(Tabella 12) *significatività nei Giri sul numero e durata delle fissazioni*

<b>Giro</b>	<b>Numero di fissazioni</b>	<b>Durata media delle fissazioni</b>
Giro 1	F = 5.49, <i>p-val</i> = 0.031 (*)	F = 3.50, <i>p-val</i> = 0.078 (*)
Giro 3	F = 7.48, <i>p-val</i> = 0.014 (*)	F = 6.46, <i>p-val</i> = 0.020 (*)
Giro 4	F = 9.70, <i>p-val</i> = 0.006 (*)	F = 5.78, <i>p-val</i> = 0.027 (*)
Giro 5	F = 7.68, <i>p-val</i> = 0.013 (*)	F = 5.37, <i>p-val</i> = 0.032 (*)

Le medie calcolate per il numero e la durata delle saccadi evidenziano differenze interessanti tra i due gruppi di piloti, esperti e non esperti. Per i piloti non esperti, si riscontrano una media di saccadi per giro che varia da 115.4 a 132.9 e una durata media delle saccadi che va da 80.177 a 88.142 millisecondi. Mentre per i piloti esperti, si osserva una media di saccadi per giro compresa tra 94.8 e 124.3 e una durata media delle saccadi tra 58.644 e 67.399 millisecondi. Questo suggerisce che i piloti non esperti potrebbero manifestare un numero maggiore di saccadi e durate leggermente più estese rispetto agli esperti.

I risultati del test t di Student confermano queste osservazioni. Nel confronto tra piloti esperti e non esperti per il numero di saccadi per giro, si rileva un valore p significativo nei giri 1, 3, 4 e 5 ( $p = 0.031$ ,  $p = 0.014$ ,  $p = 0.006$ ,  $p = 0.016$  rispettivamente). Questi risultati indicano che vi sono differenze statisticamente significative nel numero di saccadi tra i due gruppi di piloti, con i non esperti che mostrano un numero maggiore di saccadi in questi specifici giri.

### *Saccadi*

Sono state calcolate il numero e la durata delle saccadi nei due gruppi di piloti (esperti e non esperti). In base agli anni di pratica, sono state calcolate le medie per il numero e la durata delle saccadi. Le medie mostrano che per i *non esperti*, il numero medio di saccadi per giro varia da 115.4 a 132.9, mentre la durata media delle saccadi per giro va da 80.177 a 88.142 millisecondi. Per gli *esperti*, il numero medio di saccadi per giro va da 94.8 a

124.3, mentre la durata media delle saccadi per giro varia da 58.644 a 67.399 millisecondi. Questo suggerisce che i piloti non esperti effettuano un numero maggiore di saccadi di durata leggermente maggiori rispetto agli esperti. Successivamente, è stato eseguito un test *t* di Student per determinare se queste differenze sono statisticamente significative. I risultati mostrano che ci sono differenze statisticamente significative nel numero di saccadi tra i gruppi di esperti e non esperti in alcuni giri specifici. I non esperti tendono ad avere un numero maggiore di saccadi in questi giri (tabella13).

(Tabella13) *significatività sui giri tra esperti e non esperti sul numero delle saccadi*

<b>Giro</b>	<b>t-value</b>	<b>p-value</b>
<b>1</b>	2.34	0.031
<b>3</b>	2.72	0.014
<b>4</b>	3.11	0.006
<b>5</b>	2.66	0.016

Nonostante il numero diverso di saccadi, nessuna delle misure della durata media ha evidenziato differenze significative tra i gruppi. Questo suggerisce che la durata media delle saccadi potrebbe non essere un indicatore per distinguere la differenza tra piloti esperti e non esperti.

Le analisi di associazione tra giro veloce e numero di saccadi hanno prodotto i seguenti risultati di correlazione in termini di performance. I dati rivelano correlazioni significative nel giro 2 tra la velocità e il numero di saccadi, così come tra il tempo di giro e il numero di saccadi (correlazione = -0.626, *p*-value = 0.003 e correlazione = 0.665, *p*-value = 0.001, rispettivamente). Questi risultati suggeriscono che una maggiore velocità è correlata a un minor numero di saccadi, mentre tempi di giro più prolungati si associano a un aumento del numero di saccadi. È importante notare che, per gli altri giri, le correlazioni tra velocità/tempo di giro e numero di saccadi non sono risultate statisticamente significative (*p*-value > 0.05).

(tabella 14) *correlazione tra velocità numero di saccadi, piloti esperti e non esperti*

<b>Gruppo</b>	<b>Giro 2</b>
Piloti Esperti	-0.686, <i>p</i> = 0.028* ( <i>p</i> -value < 0.05)

Questi risultati indicano una correlazione negativa significativa tra la velocità e il numero di saccadi per i piloti esperti nel giro 2, suggerendo che a velocità maggiori corrispondono meno saccadi. Tuttavia, per i piloti non esperti, non sono emerse correlazioni statisticamente significative tra la velocità e il numero di saccadi in nessuno degli altri giri analizzati.

Per esaminare se la durata media delle saccadi può essere un predittore del tempo sui giri è stata effettuata una regressione lineare analizzando la relazione tra la durata media delle saccadi e il tempo impiegato per completare ciascun giro, sia per i piloti esperti sia per i non esperti.

È stata effettuata la regressione lineare separatamente per ogni gruppo e per ogni giro, utilizzando la durata media delle saccadi come variabile indipendente e il tempo di percorrenza del giro come variabile dipendente. I risultati delle regressioni lineari per i due gruppi di piloti di go kart (esperti e non esperti) ha prodotto i seguenti risultati:

(tabella 15) dati regressione lineare tra esperti e non esperti (durata saccadi / tempo giro)

<b>Esperti</b>			
<b>Giro</b>	<b>Coefficiente (effetto per ms)</b>	<b>Intercept</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Giro 1	-0.117	58.69	0.164
Giro 2	0.079	47.87	0.015
Giro 3	-0.017	49.35	0.009
Giro 4	-0.005	48.44	0.002
Giro 5	-0.007	48.23	0.003

<b>Non Esperti</b>			
<b>Giro</b>	<b>Coefficiente (effetto per ms)</b>	<b>Intercept</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Giro 1	-0.006	53.17	0.001
Giro 2	-0.008	50.41	0.009
Giro 3	-0.020	50.78	0.052
Giro 4	-0.047	53.06	0.141
Giro 5	-0.027	51.39	0.076

Per i piloti esperti, il Giro 1 mostra un valore di R<sup>2</sup> relativamente alto (0.164), suggerendo che la durata delle saccadi può spiegare il 16.4% della varianza nel tempo di giro, con un

effetto negativo sulla durata per ms. Gli altri giri mostrano una spiegazione molto bassa della varianza.

Per i piloti non esperti, il Giro 4 mostra il valore di  $R^2$  più alto (0.141), indicando che la durata delle saccadi spiega il 14.1% della varianza nel tempo di percorrenza. Anche in questo caso, gli effetti sono negativi.

Questi risultati suggeriscono che la durata delle saccadi potrebbe avere un impatto sulla performance, particolarmente in alcuni giri specifici, ma generalmente, la loro capacità di predire il tempo di giro è limitata.

la regressione lineare per ciascun giro, confrontando il tempo sui giri in relazione al numero di saccadi per i due gruppi, ha mostrato i seguenti risultati:

(tabella 16) *regressione lineare tra esperti e non esperti (numero saccadi / tempo giro)*

<b>Esperti</b>			
<b>Giro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Intercept</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Giro 1	-0.065	57.78	0.044
Giro 2	0.255	24.81	0.539
Giro 3	0.018	46.55	0.008
Giro 4	0.019	46.34	0.009
Giro 5	0.005	47.25	0.001

<b>Non Esperti</b>			
<b>Giro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Intercept</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Giro 1	0.113	38.83	0.189
Giro 2	0.041	45.01	0.033
Giro 3	-0.055	55.67	0.089
Giro 4	0.032	45.30	0.034
Giro 5	-0.124	63.40	0.136

Nel secondo giro, l'analisi rivela un valore significativamente elevato per il coefficiente di determinazione  $R^2$ , pari a (0.539). Questo dato suggerisce che il numero di saccadi oculari è in grado di spiegare il 53.9% della varianza osservata nel tempo impiegato per completare il giro. Questo risultato ci permette di notare che le saccadi oculari hanno un effetto positivo sul tempo di percorrenza, indicando che una maggiore frequenza di movimenti oculari è associata a un tempo di percorrenza più rapido. Per coloro che non sono esperti, i dati indicano che nei Giri 1 e 5 le variazioni nel numero di saccadi oculari

hanno un impatto maggiore sul tempo impiegato per completare il percorso, sebbene questa influenza sia soggetta a una maggiore variabilità rispetto agli altri giri. Questi risultati suggeriscono che i piloti, sia esperti che meno esperti, gestiscono in modo diverso i movimenti oculari durante il giro, il che può influenzare le loro prestazioni in modi variabili in ogni tratto della corsa.

Dai dati analizzati e dai risultati delle regressioni lineari, possiamo iniziare a identificare alcuni potenziali pattern visivi e comportamentali legati alle saccadi oculari tra i piloti esperti e non esperti. Ecco alcune osservazioni e ipotesi:

#### *Impatto delle saccadi sul tempo di giro*

Nei piloti esperti al giro 2, dove il  $R^2$  è il più alto (0.539), si nota che un numero maggiore di saccadi è associato a un aumento del tempo di giro. Questo potrebbe indicare che in giri più complessi o tecnici, gli esperti utilizzano le saccadi per ottenere più informazioni dall'ambiente, il che potrebbe temporaneamente rallentarli ma potenzialmente migliorare la loro capacità di navigazione o decisione.

Per i piloti non Esperti: La variabilità del tempo di giro sembra essere più influenzata dal numero di saccadi nei Giri 1 e 5. Questo suggerisce che i non esperti potrebbero non essere altrettanto efficienti nell'utilizzare le saccadi per migliorare le loro prestazioni o potrebbero essere meno consistenti nel loro approccio visivo.

#### *Efficienza nell'uso delle saccadi*

Gli esperti sembrano avere una correlazione diretta meno forte tra le saccadi e i tempi di giro, tranne che in specifiche situazioni (come il Giro 2). Questo potrebbe riflettere un utilizzo più strategico e mirato delle saccadi per raccogliere informazioni cruciali senza che questo influenzi negativamente le loro prestazioni generali.

I non esperti, d'altra parte, mostrano una correlazione più forte in certi giri, il che potrebbe indicare un apprendimento o un adattamento in corso su come e quando fare saccadi per massimizzare l'efficacia visiva durante la guida.

#### *Comportamento visivo e adattamento*

Per gli esperti potrebbero aver sviluppato capacità di produrre saccadi rapide e precise che permettono loro di mantenere elevate prestazioni anche sotto stress o in condizioni di gara difficile. Ciò è supportato dalla minore variabilità nei coefficienti di regressione attraverso i giri, indicando un approccio più uniforme e possibilmente ottimizzato. I Piloti non esperti mostrano una variabilità nei loro coefficienti e nei valori di  $R^2$ , suggerendo che potrebbero ancora essere in fase di ottimizzazione del loro approccio visivo. Questo potrebbe riflettere una maggiore sensibilità agli elementi del percorso o una minore capacità di filtrare le informazioni irrilevanti, portando ad effettuare saccadi meno efficaci.

### ***Blink***

Dopo aver confrontato le medie totali per il numero e la durata degli ammiccamenti tra piloti esperti e non esperti, sono stati condotti test  $t$  di Student per verificare la significatività statistica delle differenze sulle medie degli ammiccamenti (Tabella 17).

(Tabella 17) *Numero e Durata Media degli Ammiccamenti tra Piloti Esperti e Non Esperti*

<b>Blinks Tot. Giro</b>	<b>Esperti</b>	<b>Non Esperti</b>
Numero Medio di Blinks	37.57	57.6
Durata Media dei Blinks (ms)	172.35	191.17

I risultati sul numero dei Blinks ha evidenziato un valore di significatività, leggermente superiore al livello di significatività comune del 5% ( $t = -1,84$  con  $p$ -value di 0,082). Suggerendo l'assenza di significatività tra i due gruppi. Per quanto riguarda la durata media degli ammiccamenti, le analisi hanno mostrato valori vicino alla soglia di significatività del 5% ( $t = 2,06$  con un  $p$ -value di 0,055). La presenza di una differenza quasi significativa nella durata media degli ammiccamenti tra i due gruppi, con i non esperti che mostrano una tendenza a avere ammiccamenti più lunghi. La vicinanza alla significatività, specialmente per la durata degli ammiccamenti, potrebbe indicare una tendenza interessante sulla condotta visiva tra piloti esperti e non esperti.

Dai dati, emerge chiaramente che i piloti non esperti presentano un numero medio di ammiccamenti più elevato e una durata media degli ammiccamenti più lunga rispetto ai

piloti esperti in tutti i giri. Questo suggerisce che i piloti meno esperti tendono ad avere una maggiore frequenza e durata di Blinks.

(tabella 18) *medie numero e durata blinks esperti/non esperti*

<b>Giro</b>	<b>Esperti (N. Medio Blinks)</b>	<b>Non Esperti (N Medio Blinks)</b>	<b>Esperti (Durata Media Blinks in ms)</b>	<b>Non Esperti (Durata Media Blinks in ms)</b>
0	34	56.1	179.4	193.1
1	35.9	52.5	169.1	185.7
2	41.8	57.6	170.2	189.8
3	39.2	59.4	170.8	192.5
4	37.7	59.2	174.6	190.6
5	36.8	60.8	170.1	195.3

Sono state condotte analisi utilizzando la regressione lineare per valutare l'impatto della durata media dei blink sulla velocità di ogni gruppo di piloti (esperti e meno esperti). I coefficienti di regressione e i relativi valori (*p-values*) sono stati calcolati per determinare la significatività statistica di ciascun predittore sulla variabile dipendente. Questo ci ha permesso di valutare se e in che misura la durata dei blink influenza la velocità.

(Tabella 19) *risultati regressione lineare (durata media Blink/velocità) per giri*

<b>Giro</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>p-value</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>0</b>	Esperti	0.088	0.47	0.067
	Meno Esperti	0.184	0.155	0.235
<b>1</b>	Esperti	0.046	0.766	0.012
	Meno Esperti	0.048	0.736	0.015
<b>2</b>	Esperti	-0.359	0.054	0.389
	Meno Esperti	0.087	0.389	0.094
<b>3</b>	Esperti	0.080	0.450	0.073
	Meno Esperti	0.097	0.294	0.136
<b>4</b>	Esperti	-0.085	0.293	0.137
	Meno Esperti	0.067	0.519	0.054
<b>5</b>	Esperti	-0.034	0.658	0.026
	Meno Esperti	-0.078	0.585	0.039

La maggior parte dei coefficienti non sono statisticamente significativi (*p-value* > 0.05), indicando che la durata media dei blink non sembra essere un predittore affidabile della velocità sul giro. Tuttavia, il Giro 2 per gli esperti mostra una correlazione negativa con

un  $p$ -value vicino al limite della significatività statistica ( $p = 0.054$ ) e un  $R^2$  relativamente alto (0.389), suggerendo che in questo caso specifico la durata dei blink potrebbe avere una influenza sulla velocità.

i risultati delle regressioni lineari che esaminano l'impatto del numero dei blink sulla velocità sul giro, per ciascun gruppo di piloti (esperti e meno esperti).

(tabella 20) *regressione lineare tra esperti e non esperti (numero Blinks / Velocità)*

<b>Giro</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b><math>p</math>-value</b>	<b><math>R^2</math></b>
0	Esperti	0.212	0.131	0.262
	Meno Esperti	0.122	0.166	0.225
1	Esperti	0.208	0.030	0.464
	Meno Esperti	0.078	0.396	0.091
2	Esperti	-0.234	0.061	0.372
	Meno Esperti	0.049	0.617	0.033
3	Esperti	0.110	0.199	0.197
	Meno Esperti	0.075	0.281	0.143
4	Esperti	0.102	0.265	0.152
	Meno Esperti	0.069	0.482	0.064
5	Esperti	0.072	0.446	0.074
	Meno Esperti	0.110	0.269	0.150

Per gli esperti, il numero dei blink ha mostrato delle relazioni interessanti con la velocità durante i vari giri. Nel Giro 1, abbiamo osservato una correlazione positiva significativa ( $R^2=0.464$ ,  $p = 0.030$ ), suggerendo che un aumento del numero dei blink potrebbe essere associato a un incremento della velocità su questo particolare giro. Nel Giro 2 per gli esperti, anche se la correlazione negativa non raggiunge la significatività statistica ( $R^2=0.372$ ,  $p = 0.061$ ), il trend indica che un maggiore numero di blink potrebbe essere correlato a una diminuzione della velocità.

Per quanto riguarda i meno esperti, nessuna delle analisi ha mostrato un p-value inferiore a 0.05, suggerendo che il numero dei blink non è un forte predittore della velocità per questo gruppo.

Questi risultati suggeriscono che per gli esperti, il numero dei blink potrebbe essere direttamente correlato alla loro capacità di gestire la velocità durante i giri, forse indicando una maggiore abilità nel controllare le distrazioni o la fatica durante la guida.

Guardando ai risultati riportati, emerge un pattern di comportamento visivo differente tra esperti e non esperti riguardo al numero e alla durata degli ammiccamenti durante i giri.

Per quanto riguarda il numero medio di ammiccamenti, i piloti non esperti mostrano un valore più elevato rispetto agli esperti in tutti i giri. Questo suggerisce che i piloti meno esperti tendono ad avere una maggiore frequenza di ammiccamenti. D'altra parte, gli esperti hanno un numero medio di ammiccamenti più basso, indicando una maggiore capacità di mantenere la concentrazione visiva.

Quanto alla durata media degli ammiccamenti, i piloti non esperti mostrano una tendenza a presentare ammiccamenti più lunghi rispetto agli esperti in tutti i giri. Questo potrebbe indicare una differenza nella gestione della fatica o delle distrazioni visive tra i due gruppi. Gli esperti, con ammiccamenti più brevi, potrebbero essere in grado di mantenere una maggiore concentrazione visiva e reattività durante la guida, mentre i non esperti potrebbero essere più inclini a subire una maggiore fatica visiva o a essere più distratti.

In sintesi, i piloti non esperti mostrano una maggiore frequenza e durata degli ammiccamenti, suggerendo una minore capacità di mantenere la concentrazione visiva e una maggiore suscettibilità alla fatica o alle distrazioni rispetto agli esperti. Questi pattern potrebbero riflettere differenze nell'esperienza, nell'abilità di gestire la concentrazione visiva e nell'adattamento alla guida ad alte prestazioni.

*Correlazioni tra numero di blink e tempo dei giri:*

Le analisi evidenziano una correlazione negativa tra il numero di blink e il tempo dei giri, con valori negativi predominanti in entrambi i gruppi per la maggior parte dei giri. Questo implica che un aumento dei blink sia associato a tempi di giro più lunghi, suggerendo una

possibile relazione tra un numero maggiore di blink, minore concentrazione o maggiore fatica, e un impatto negativo sul tempo di giro. In particolare, le correlazioni negative risultano più accentuate tra gli esperti per alcuni giri, indicando che il fenomeno potrebbe manifestarsi in modo più evidente in questo gruppo.

I risultati del (*t test*) indicano che vi sono differenze significative nel numero medio di blink tra esperti e non esperti nei giri 4 e 5. Nel dettaglio, per il giro 4, ( $t = -2.15$   $p = 0.0465$ ), e per il giro 5, ( $t = -2.68$   $p = 0.0167$ ). Ciò implica che i non esperti tendono a blinkare più frequentemente rispetto agli esperti.

Il numero di blink mostra una correlazione negativa significativa con il tempo dei giri, questo indice può essere considerato come un indicatore di prestazione nei giri di go-kart, soprattutto tra i piloti esperti. È stato dimostrato come i piloti non esperti effettuano più blinks nei giri finali, suggerendo un maggiore livello di stress o fatica finale. Infine, la correlazione negativa più forte tra i blink e il tempo sul giro nei piloti esperti potrebbe indicare una maggiore sensibilità agli effetti della fatica o della distrazione sulle prestazioni complessive.

I risultati delle regressioni lineari sulla durata dei blink, evidenziano una situazione simile in entrambi i gruppi. Nel gruppo degli esperti, il modello spiega solo l'1.3% della variabilità del tempo di giro, mentre nel gruppo dei non esperti questa percentuale è leggermente più alta, arrivando al 11.6%, ma rimane comunque relativamente bassa.

In entrambi i casi, il coefficiente associato alla durata media dei blink non è risultato statisticamente significativo ( $p\text{-value} > 0.05$ ). Nel gruppo degli esperti, il coefficiente è positivo, portando a indicare che un aumento della durata media dei blink potrebbe essere associato a un aumento dei tempi sul giro. Al contrario, nel gruppo dei non esperti, il coefficiente è negativo, suggerendo che un aumento della durata media dei blink potrebbe essere correlato a una diminuzione del tempo sui giri.

#### *Diametro Pupilla*

La dilatazione pupillare è un indicatore cruciale per valutare il carico cognitivo e la stanchezza visiva durante la guida. Durante l'attività di guida, la pupilla si espande in

risposta a una serie di stimoli visivi e cognitivi, inclusi cambiamenti di illuminazione, sforzo mentale e livello di attenzione richiesto dall'azione di guida stessa.

Nel contesto dei singoli giri, la dilatazione pupillare può rivelare diverse situazioni significative nei piloti di Go kart come alto carico cognitivo: soprattutto nelle situazioni che richiedono una maggiore concentrazione dove è probabile che la pupilla si dilati per gestire il carico cognitivo aggiuntivo. Come situazioni di traffico, curve impegnative che possono provocare un'espansione della pupilla. La dilatazione pupillare può anche essere un indicatore di fatica visiva accumulata durante la guida. Man mano che i piloti si affaticano. Inoltre può riflettere il livello generale di attenzione del pilota. Periodi di maggiore attenzione sono associati a una maggiore dilatazione pupillare, mentre un calo dell'attenzione può portare a una riduzione della dilatazione pupillare. La pupilla è sensibile agli stimoli improvvisi nell'ambiente circostante durante la guida, come l'apparizione improvvisa di veicoli o ostacoli sulla strada.

L'analisi sulla dilatazione pupillare durante i vari giri tra esperti e non esperti in questo caso può fornire informazioni utili per distinguere la loro capacità di guida. Le medie sul diametro della pupilla tra i vari giri, tra piloti esperti e non esperti hanno riportato le seguenti medie.

(Tabella 21) medie dilatazione pupillare per Giro esperti Non Esperti

<b>Giro</b>	<b>Piloti Esperti (mm)</b>	<b>Piloti Non Esperti (mm)</b>
0	2.986	3.084
1	3.037	3.169
2	3.090	3.200
3	3.108	3.216
4	3.122	3.223
5	3.117	3.173

La media totale del diametro della pupilla è leggermente maggiore nei piloti non esperti rispetto agli esperti, con valori rispettivamente di 3.178 mm e 3.077 mm. Tuttavia, il *test t* di Student non ha mostrato differenze significative ( $t = -0.483$ ,  $p\text{-value} = 0.635$ ), dimostrando che non ci sono differenze sostanziali nel diametro medio della pupilla tra i due gruppi su tutti i giri analizzati.

Analizzando i risultati delle regressioni lineari, emerge che il diametro medio della pupilla non ha un impatto significativo sulla velocità né sul tempo di giro. Per quanto riguarda la velocità, il coefficiente associato al diametro della pupilla è molto piccolo e non raggiunge significatività statistica ( $p\text{-value} = 0.507$ ), indicando che la pupilla non è un predittore efficace della velocità di giro. Allo stesso modo, per quanto riguarda il tempo impiegato per completare un giro, il coefficiente associato al diametro della pupilla è negativo e non significativo ( $p\text{-value} = 0.379$ ), suggerendo che la pupilla non è un buon predittore del tempo impiegato. In sintesi, sulla base di questi risultati, non sono emerse prove sostanziali che indichino un'influenza significativa del diametro della pupilla sulla velocità o sul tempo di giro.

Guardando ai dati sulla dilatazione pupillare tra piloti esperti e non esperti durante i vari giri, notiamo una leggera tendenza: i piloti non esperti sembrano avere mediamente una pupilla leggermente più dilatata rispetto agli esperti, anche se questa differenza non è risultata statisticamente significativa. Queste circostanze potrebbe suggerire che, durante questa specifica attività, le differenze nel carico cognitivo o nell'attenzione richiesta non sono così pronunciate da manifestarsi in variazioni significative nella dilatazione pupillare tra i due gruppi.

Questo pattern potrebbe indicare che entrambi i gruppi di piloti, esperti e non esperti, affrontano in modo simile le sfide visive e cognitive specifiche di questo circuito o di questa situazione di guida. Tuttavia, è importante considerare che le differenze potrebbero emergere in condizioni di pista diverse o in situazioni di guida più impegnative. Ad esempio, tratti di pista più tecnici o situazioni di traffico intenso potrebbero mettere a dura prova le capacità cognitive e di attenzione dei piloti, manifestandosi in variazioni più significative nella dilatazione pupillare tra i due gruppi.

#### **8.2.4 Analisi settore Esperti/ Non esperti**

Durante le sessioni di prova dei piloti di go-kart, sono stati valutati anche attraverso l'analisi di segmenti specifici della pista. Le variabili pertinenti sono state estratte da segmenti video che coprivano il tratto di pista dalla fine della curva 1 (EC1) all'inizio della curva 9 (SC9). Questa estrazione è stata facilitata attraverso l'utilizzo di tag eventi,

consentendo di rilevare con precisione il momento in cui si passava da un punto all'altro. Questo metodo ha permesso di ottenere non solo i tempi di percorrenza del segmento di pista considerato, ma anche di acquisire dati relativi alle variabili oculari oggetto di studio.

### *Blinks*

I risultati degli ammiccamenti durante le prove sul settore suggeriscono che i piloti non esperti tendono ad effettuare ammiccamenti più frequentemente rispetto agli esperti con una media tra gli Esperti di circa 17,52 blinks a giro rispetto ai Non Esperti con 25,92 blinks a giro ( $t = -4.03$   $p = 0.0001$ ). L'analisi della varianza (ANOVA) ha mostrato un valore di  $F = 16.26$ , con  $p = 0.00$ . Questo indica che esistono differenze statisticamente significative nel numero complessivo di "blinks" tra i piloti esperti e non esperti su tutti i giri. Nessuno dei giri effettuati ha mostrato differenze statisticamente significative ( $p < 0.05$ ) nel numero di "blinks" tra i due gruppi, sebbene l'ultimo giro (giro 5) ha mostrato una soglia vicina alla significatività con  $t = -1.99$   $p = 0.064$ .

Successivamente è stata effettuata la correlazione tra il numero totale di "blinks" e il tempo impiegato a percorrere il settore in ciascun giro per osservare le differenze in termini di efficacia tra i due gruppi. La correlazione tra il tempo medio impiegato nel settore e il totale dei "blinks" è di circa -0.478. Questo indica una correlazione negativa moderata: i piloti impiegano meno tempo a completare il settore e tendono a avere un numero minore di "blinks". Questo potrebbe suggerire che una maggiore concentrazione e focus sulla conduzione del mezzo produce tempi di giro più veloci.

*(Tabella 22) di correlazione blinks/settore tra i giri*

<b>Giro</b>	<b>Correlazione</b>	<b>p-value</b>
0	-0.276	0.239
<b>1</b>	<b>-0.530</b>	<b>0.016*</b>
2	-0.291	0.214
3	-0.382	0.097
4	-0.286	0.222
5	-0.287	0.219

La tabella (22) mostra una correlazione negativa significativa (-0.530) con un p-value di 0.016, nel giro 1, una diminuzione nel tempo di giro è associata significativamente a un minor numero di “blinks”. Gli altri giri non mostrano correlazioni statisticamente significative.

Non sono emerse significatività evidenti sulla durata degli ammiccamenti ( $t = -1.59$   $p = 0.136$ ). Le medie sulla durata dei blinks per i due gruppi hanno comunque mostrato per i non esperti una durata media dei blinks più alta rispetto agli esperti con una media di 173.69 (ms) rispetto ai 192.65 (ms) dei non esperti. Le correlazioni tra la durata dei blinks e il tempo per ciascun giro sono generalmente molto basse e non significative, ad eccezione del Giro 5, dove c'è una correlazione moderata positiva (0.384), ma con un p-value al di sopra della soglia di significatività comune (0.05). Un'altra osservazione rilevante riguarda la correlazione significativa tra la frequenza dei i Blinks e tempo per i piloti esperti. Questa correlazione moderatamente negativa nel giro 1 (-0.641) con un p-value di 0.046 conferma la tendenza nei piloti esperti a compiere il minor numero di ammiccamenti del minor numero di ammiccamenti, con la tendenza tendono durante il primo giro ad essere più efficace. Al contrario, nei giri successivi, dove le correlazioni tra il numero degli ammiccamenti e i tempi di settore mostrano correlazioni basse e non significative. Differente è in termini di durata dove i risultati ci suggeriscono una non significatività.

### *Fissazioni*

Per quanto riguarda la frequenza e durata delle fissazioni sul livello di I piloti non esperti tendono a fissare più frequentemente, il che potrebbe indicare una maggiore difficoltà nel processare visivamente la pista, o un bisogno di confermare più spesso le informazioni visive a causa di minore familiarità o sicurezza. La differenza è statisticamente significativa (tabella 23).

(Tabella 23) *descrittive fissazioni esperti non esperti settore pista*

<b>Piloti</b>	<b>N. Medio Fissazioni</b>	<b>Durata Media Fissazioni (ms)</b>
Esperti	42.57	416.43
Non Esperti	48.00	339.74

<i>t-Test</i>	-3.10	4.21
<i>p-value</i>	0.0025	0.00005

L'analisi della varianza (ANOVA) ha confermato le risultanze sia in termini di frequenza che durata su tutti i giri svolti. (Tabella 24)

*(Tabella 24) significatività differenze medie sul numero e durata delle fissazioni*

<b>fissazioni settore</b>	<b>F-statistic</b>	<b>p-value</b>
Numero di Fissazioni	9.62	0.0024
Durata delle Fissazioni	17.73	0.00005

conferma che ci sono differenze significative sul numero e durata delle fissazioni tra piloti esperti e non esperti su tutti i giri effettuati. Questi risultati suggeriscono che i non esperti tendono a cambiare frequentemente il punto di osservazione, I piloti esperti mantengono le fissazioni per periodi più lunghi, il che può riflettere una maggiore capacità di elaborazione delle informazioni visive necessarie per la navigazione ottimale della pista.

Per determinare la significatività sulle differenze nel numero e nella durata delle fissazioni tra i piloti esperti e non esperti giro per giro, è stato eseguito un (test t) per ogni coppia di colonne relative a ciascun giro (tabella 25).

*(Tabella 25) significatività sulle differenze medie sul numero e durata delle fissazioni per giro*

<b>Giro</b>	<b>(t- test) N. Fissazioni</b>	<b>p-value</b>	<b>(t- test) Durata Fissazioni</b>	<b>p-value</b>
0	0.355	0.728	1.053	0.313
1	-1.558	0.141	1.778	0.099
2	-1.290	0.216	1.416	0.174
3	-1.582	0.132	1.548	0.141
<b>4</b>	<b>-2.892</b>	<b>0.010*</b>	<b>2.370</b>	<b>0.030*</b>
5	-2.045	0.058*	1.882	0.079

I risultati indicano che ci sono differenze significative nel comportamento visivo tra piloti esperti e non esperti di go-kart, particolarmente evidenti durante il (Giro 4). In questo

giro, i dati mostrano che i piloti non esperti tendono a fissare più frequentemente rispetto agli esperti, come evidenziato da un  $p$ -value di 0.010. Questo suggerisce che i piloti meno esperti potrebbero necessitare di più punti di riferimento visivi durante il settore, o potrebbero semplicemente avere una minore capacità di elaborazione visiva.

Parallelamente, la durata delle fissazioni durante lo stesso giro rivela che gli esperti mantengono le fissazioni per periodi più lunghi, con un  $p$ -value di 0.030. Questo potrebbe indicare una maggiore capacità di concentrarsi su elementi cruciali del percorso, permettendo una migliore elaborazione delle informazioni visive.

Per stabilire se esiste una correlazione tra il tempo impiegato sul settore rispetto alla frequenza e durata delle fissazioni per ogni giro sono state calcolati i coefficienti di correlazione di Pearson (tabella 26).

(Tabella 26) tabella di correlazione fissazioni tempo settore

<b>Giro</b>	<b>Numero di Fissazioni</b>	<b>(p-value)</b>	<b>Durata delle Fissazioni</b>	<b>(p-value)</b>
0	0.498	0.026	0.331	0.153
1	0.187	0.430	0.325	0.162
2	0.201	0.396	0.280	0.232
3	-0.041	0.863	0.457	0.043
4	0.031	0.896	0.299	0.201
5	0.133	0.576	0.254	0.279

Per quanto riguarda il numero di fissazioni, si osserva una correlazione significativa solo nel Giro 0 ( $r = 0.498$ ,  $p = 0.026$ ), suggerendo un aumento nel numero di fissazioni nei giri più rapidi. Questo potrebbe indicare un'intensificazione della ricerca visiva in condizioni di guida più veloci o stressanti.

Per quanto riguarda la durata delle fissazioni, si osserva una correlazione significativa solo nel Giro 3 ( $r = 0.457$ ,  $p = 0.043$ ), indicando che tempi di giro più rapidi sono associati a fissazioni più lunghe in questo giro specifico.

Nei piloti esperti, le correlazioni tra il numero e la durata delle fissazioni per giro sono rimaste generalmente basse e non significative, indicando una stabile efficienza nella gestione visiva indipendentemente dalla velocità di guida. Tuttavia, nel Giro 3, è stata

osservata una correlazione moderata (0.504) nella durata delle fissazioni, sebbene non significativa.

Per quanto riguarda i piloti non esperti, nel Giro 0 è emersa una correlazione più forte nel numero di fissazioni (0.622), che si avvicina alla significatività ( $p\text{-value} = 0.055$ ). Inoltre, nel Giro 5, la durata delle fissazioni ha mostrato una correlazione significativa (0.714) con un  $p\text{-value}$  di 0.020, suggerendo che in condizioni di guida più veloci, i piloti non esperti tendono a mantenere le fissazioni per periodi più lunghi.

Questi risultati indicano che il comportamento delle fissazioni, sia in termini di numero che di durata, può variare significativamente tra piloti esperti e non esperti nel settore.

#### *Diametro Pupillare*

Per ottenere una visione complessiva del diametro medio della pupilla per i piloti esperti e non esperti, sono state calcolate le medie generali di tutti i giri per ciascun gruppo. Successivamente, è stato eseguito un test  $t$  per determinare se esistono differenze statisticamente significative tra le medie complessive dei due gruppi.

Le medie complessive del diametro della pupilla sono risultate essere 3.16 mm per i piloti esperti e 3.28 mm per i piloti non esperti. Nonostante la differenza il  $t$  test ha indicato che questa differenza non è statisticamente significativa ( $t = -1.467$ ,  $p = 0.145$ ), suggerendo che non ci sono differenze sostanziali nel diametro della pupilla tra i due gruppi a livello complessivo.

Questi risultati evidenziano che, nonostante una leggera differenza nella media del diametro pupillare tra i due gruppi, tale variazione non è sufficiente per confermare una differenza significativa tra piloti esperti e non esperti.

Anche il test di Levene per valutare l'uguaglianza delle varianze del diametro della pupilla tra piloti esperti e non esperti non ha evidenziato le significatività. I risultati del test hanno mostrato che non ci sono differenze significative nelle differenze di misura del diametro della pupilla tra i due gruppi. Questo suggerisce che la variabilità nella dilatazione pupillare non ha una correlazione diretta con il livello di esperienza dei piloti

sul settore di pista specifica, e che entrambi i gruppi hanno mostrato una distribuzione omogenea delle misure pupillari nonostante le differenze di esperienza di guida.

L'analisi di cluster condotta sulle misure del diametro della pupilla dei piloti di go-kart ha fornito risultati significativi che possono essere utilizzati per comprendere meglio le caratteristiche fisiologiche oculari dei partecipanti. La preparazione dei Dati è stata effettuata selezionando le colonne relative al diametro medio della pupilla per ogni giro, e dopo un'accurata pulizia dei dati è stata effettuata una normalizzazione dei dati per poter standardizzare le caratteristiche su una scala comune, prevenendo l'influenza eccessiva di valori numerici di grande entità sul risultato del clustering.

Dai risultati, è emerso che i piloti sono stati raggruppati in tre cluster distinti, ognuno con caratteristiche pupillari peculiari (tabella 27). Il Cluster 0 sembra comprendere piloti con una risposta pupillare mediamente costante, mentre il Cluster 1 riflette una variazione moderata nel diametro pupillare e il Cluster 2 mostra variazioni più pronunciate. Queste differenze potrebbero riflettere variazioni nei livelli di arousal o concentrazione durante la guida.

Inoltre, è interessante notare che il Cluster 0 contiene solo un pilota, indicando che potrebbe avere caratteristiche peculiari non condivise con gli altri. Il Cluster 1 è il più numeroso e include una varietà di partecipanti, suggerendo una certa comunanza nelle caratteristiche pupillari tra i piloti. Infine, il Cluster 2 sembra rappresentare un gruppo di piloti con una risposta pupillare distintiva, potenzialmente legata a differenti reazioni allo stress o alla concentrazione.

Queste informazioni sono cruciali per personalizzare programmi di allenamento o per studiare più approfonditamente come le condizioni di gara influenzino la fisiologia dei piloti. Inoltre, l'analisi delle caratteristiche dei cluster in termini di età e anni di esperienza fornisce ulteriori insights. Ad esempio, il Cluster 2 mostra una media di età più alta e un minor numero di anni di esperienza rispetto agli altri cluster, il che potrebbe indicare differenze nel modo in cui i piloti più anziani rispondono alle condizioni di guida rispetto ai loro colleghi più giovani.

Complessivamente, questi risultati forniscono una base solida per ulteriori studi sull'ottimizzazione delle performance dei piloti e sull'adattamento delle strategie di allenamento in base alle loro caratteristiche fisiologiche individuali.

(Tabella 27) *descrittive analisi Cluster*

<b>Cluster</b>	<b>Media Età</b>	<b>Dev. Std. Età</b>	<b>Conteggio Età</b>	<b>Media Anni Pratica</b>	<b>DS Anni Pratica</b>	<b>Conteggio Anni Pratica</b>	<b>Esperienza anni&lt;5.5</b>	<b>Esperienza anni&gt;5.5</b>
0	16.00	/	1	8.00	/	1	1	0
1	17.82	4.02	11	7.91	3.51	11	3	8
2	21.88	8.18	8	3.75	3.77	8	6	2

### *Dati IMU/Settore*

Per il settore sono stati indagati anche i momenti angolari della testa. I momenti angolari, cioè le rotazioni intorno agli assi X, Y e Z misurate dai giroscopi, sono dati fondamentali per i piloti di go-kart. Queste informazioni forniscono una panoramica della dinamica di guida e della stabilità del veicolo durante le manovre.

In particolare, i momenti angolari sono utili per valutare la stabilità e il controllo del go-kart durante curve e accelerazioni, aiutando i piloti a mantenere il controllo in diverse condizioni di guida. Essi forniscono anche un feedback prezioso sulla tecnica di guida, consentendo ai piloti di identificare aree di miglioramento e ottimizzare le loro manovre. L'analisi comparativa dei movimenti della testa tra piloti esperti e non esperti riveste una fondamentale importanza per vari motivi. Primo, offre l'opportunità di valutare le disparità nelle capacità di guida e nelle strategie adottate. I piloti esperti potrebbero manifestare schemi distintivi nei movimenti della testa associati a una maggiore consapevolezza situazionale e a una migliore capacità di anticipare gli eventi sul settore. Secondo, l'analisi dei movimenti della testa dei piloti non esperti potrebbe rivelare comportamenti che aumentano il rischio di incidenti, come una minore attenzione all'ambiente circostante o una reazione più lenta a situazioni critiche. Terzo, la valutazione dei movimenti della testa può informare lo sviluppo di programmi di addestramento mirati sia per i piloti non esperti che per quelli esperti, concentrati sull'ottimizzazione della consapevolezza situazionale, sulla gestione delle distrazioni e sull'implementazione di strategie di guida efficaci. Per questo motivo sono stati raccolti

informazioni sui dati IMU dell'eye tracker Neon per valutare possibili differenze medie sui valori lungo gli assi che esprimono i movimenti di beccheggio (pitch), imbardata (yaw) e rollio (roll).

Di seguito sono riportati i risultati delle analisi di varianza (ANOVA) condotte per valutare le differenze nelle medie di rotazione del giroscopio lungo gli assi X, Y e Z tra i piloti esperti e non esperti.

Per quanto riguarda l'asse Gyro X, l'analisi ha prodotto un valore F di 4.06 e un p-value di 0.059. Quest'ultimo valore, pur trovandosi vicino al livello di significatività comune del 0.05, indica che la differenza nelle medie di rotazione sull'asse X tra i due gruppi di piloti potrebbe essere statisticamente significativa, ma non in modo robusto. Per quanto riguarda gli assi Gyro Y e Z, l'analisi ha mostrato valori F di 0.29 e 0.76 rispettivamente, con p-value di 0.596 e 0.394. In entrambi i casi non significativi nel confronto. I piloti non esperti sembrano mostrare una media leggermente più elevata di rotazione sull'asse X rispetto ai piloti esperti, sebbene questa differenza non sia conclusivamente significativa. Tuttavia, non ci sono differenze sostanziali nelle medie di rotazione sugli assi Y e Z tra i due gruppi. Questi risultati indicano la possibilità che le abilità di guida e la gestione della stabilità della testa possano variare tra i due gruppi, specialmente per quanto riguarda la rotazione sull'asse X.

(Tabella 28) *Significatività differenze medie esperti / non esperti per gli assi X;Y;Z*

Giro	Gyro X (F-value)	Gyro X (p-value)	Gyro Y (F-value)	Gyro Y (p-value)	Gyro Z (F-value)	Gyro Z (p-value)
0	3.55	0.076	1.42	0.248	0.005	0.947
1	4.26	<b>0.054*</b>	0.84	0.372	0.78	0.389
2	2.95	0.105	0.57	0.461	0.03	0.862
3	1.13	0.302	0.95	0.344	0.22	0.644
4	2.46	0.135	1.06	0.317	0.11	0.747
5	0.56	0.465	1.03	0.323	0.02	0.894

Dai risultati osservati, emerge che il valore p associato al Gyro X durante il Giro 1 mostra una prossimità al limite della significatività, presentando un valore pari a 0.054. Tuttavia, per la maggior parte delle altre combinazioni di misurazioni e giri, le differenze non

raggiungono livelli di significatività statisticamente rilevanti, suggerendo che non siano presenti discrepanze consistenti e significative tra i piloti esperti e non esperti in termini di movimento del giroscopio lungo i diversi assi durante le sessioni di guida considerate.

sono stati condotti calcoli di correlazione tra le misurazioni medie dei momenti angolari lungo gli assi X, Y e Z e il tempo medio impiegato per completare il settore, distinguendo i dati in gruppi di piloti esperti e non esperti. I risultati ottenuti sono i seguenti:

(Tabella 29) *correlazioni con il tempo medio impiegato a completare il settore tra esperti/non esperti*

<b>Gruppo</b>	<b>(Gyro X-Y-Z)</b>	<b>Correlazione</b>	<b>P-value</b>
Esperti	Gyro X	-0.311	0.382
Esperti	Gyro Y	0.170	0.638
Esperti	Gyro Z	0.385	0.272
Novizi	Gyro X	-0.081	0.823
Novizi	Gyro Y	-0.282	0.430
Novizi	Gyro Z	0.656	0.040

Questa tabella riporta le correlazioni e i valori di  $p$  associati tra le variabili del giroscopio (Gyro X, Gyro Y, Gyro Z) e il tempo impiegato per completare il settore, distinti per i gruppi di piloti esperti e novizi. Nessuna delle correlazioni tra le variabili del giroscopio (Gyro X, Gyro Y, Gyro Z) e il tempo impiegato per completare il settore è statisticamente significativo. L'unica correlazione statisticamente significativa si riscontra tra il Gyro Z e il tempo impiegato per completare il settore ( $p = 0.04$ ). Ciò indica che un aumento della velocità angolare lungo l'asse Z è significativamente associato a tempi di percorrenza maggiori per i non esperti.

Questi risultati suggeriscono che per i piloti meno esperti, la gestione della stabilità della testa, in particolare lungo l'asse verticale (Z), potrebbe avere un impatto maggiore sulle loro prestazioni rispetto agli esperti in termini di tempo.

L'analisi dei dati IMU ha rivelato pattern interessanti nei movimenti della testa dei piloti, considerando che gli assi X, Y e Z corrispondenti rispettivamente al beccheggio (pitch), all'imbardata (yaw) e al rollio (roll).

Per quanto riguarda i piloti esperti, non sono emerse correlazioni significative tra i movimenti della testa e il tempo di completamento del settore su nessuno degli assi X, Y e Z. Questo suggerisce una stabilità costante della testa durante la guida, indipendentemente dalle variazioni del percorso.

Tuttavia, tra i piloti novizi, è stata osservata una correlazione significativa tra il rollio della testa (asse Z) e il tempo impiegato per completare il settore (valore  $p = 0.040$ ). Questo indica che i novizi tendono a inclinare lateralmente la testa in risposta alle curve o alle variazioni del percorso, il che potrebbe influenzare il tempo di percorrenza. L'incremento della velocità angolare della testa lungo l'asse Z è associato a tempi di percorrenza maggiori, suggerendo una possibile instabilità durante la guida.

In conclusione, i piloti novizi sembrano essere più sensibili ai movimenti della testa, in particolare al rollio, rispetto agli esperti. Ciò indica che la gestione della stabilità della testa, soprattutto in rollio, potrebbe essere un aspetto critico per i piloti meno esperti, influenzando le loro prestazioni di guida e i tempi di percorrenza.

## 8.2.5 Analisi Curva 1 Esperti/ Non esperti

### *fissazioni*

Risultati delle medie e del test t di Student per il numero e la durata delle fissazioni sia all'ingresso che all'uscita della curva tra piloti esperti e non esperti (tabella 30)

(Tabella 30) *Statistiche descrittive sul numero delle fissazioni ingresso/uscita tra gruppi di piloti*

<b>Fissazioni (curva 1)</b>	<b>Numero di Fissazioni</b>	<b>Durata delle Fissazioni (ms)</b>
<b>Ingresso</b>		
Esperti	3.73	403
Non Esperti	5.18	293
<i>p-value</i>	0.048*	0.204
<b>Uscita</b>		
Esperti	2.17	276
Non Esperti	3.27	259
<i>p-value</i>	0.019*	0.740

I dati sono stati analizzati attraverso un test t di Student per confrontare il numero e la durata delle fissazioni tra piloti esperti e non esperti, sia all'ingresso che all'uscita della curva.

All'ingresso della curva, si è osservata una differenza significativa nel numero di fissazioni tra i due gruppi ( $p = 0.048$ ). I piloti non esperti hanno mostrato un numero medio di fissazioni significativamente maggiore rispetto ai piloti esperti. Tuttavia, la differenza nella durata delle fissazioni non è risultata statisticamente significativa ( $p = 0.204$ ), suggerendo che, sebbene i piloti non esperti fissino più frequentemente all'ingresso della curva, la durata delle singole fissazioni non è diversa tra i due gruppi.

Analogamente, all'uscita della curva, si è osservata una differenza significativa nel numero di fissazioni tra esperti e non esperti ( $p = 0.019$ ), con i piloti non esperti che fissano più frequentemente. Tuttavia, anche in questo caso, la differenza nella durata delle fissazioni non è risultata significativa ( $p = 0.740$ ).

Questi risultati suggeriscono che, durante la guida in curva, l'attenzione visiva dei piloti non esperti potrebbe essere meno focalizzata o più soggetta a cambiamenti rispetto ai piloti esperti, evidenziando un potenziale punto di intervento per programmi di formazione o miglioramento delle abilità di guida.

Per valutare la performance, sono state condotte analisi di regressione per determinare se il numero o la durata delle fissazioni in ingresso e in uscita possano predire le velocità o i tempi nei primi 5 giri effettuati.

Nei giri iniziali, si è notata una tendenza negativa tra il numero medio di fissazioni in uscita e il tempo impiegato nei giri per i piloti esperti. I coefficienti negativi e i valori p relativamente bassi (0.07 e 0.06) indicano questa tendenza statisticamente non significatività.

Contestualmente sono stati eseguiti test di regressione lineare per valutare se la durata media delle fissazioni in uscita può predire la velocità e il tempo nei diversi giri. I risultati sulla velocità hanno prodotto i seguenti risultati in tabella:

(tabella 31) *analisi di regressione lineare (durata fissazioni uscita curva 1/Velocità sul giro)*

<b>Esperienza</b>	<b>Giro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valore p</b>
Esperti	0	-0.012	0.62
<b>Esperti</b>	<b>1</b>	<b>0.046</b>	<b>0.047*</b>
Esperti	2	0.056	0.18
<b>Esperti</b>	<b>3</b>	<b>0.042</b>	<b>0.01*</b>
<b>Esperti</b>	<b>4</b>	<b>0.034</b>	<b>0.039*</b>
<b>Esperti</b>	<b>5</b>	<b>0.041</b>	<b>0.002*</b>
Non Esperti	0	-0.028	0.36
Non Esperti	1	-0.002	0.96
Non Esperti	2	-0.008	0.68
Non Esperti	3	-0.013	0.46
Non Esperti	4	-0.007	0.74
Non Esperti	5	-0.008	0.67

Nei giri 1, 3, 4 e 5, è stata riscontrata una relazione significativa tra la durata media delle fissazioni in uscita e la velocità, come indicato dai valori  $p$  (0.047, 0.01, 0.039 e 0.002 rispettivamente). Questi risultati suggeriscono che una maggiore durata delle fissazioni in uscita può essere associata a velocità maggiori per questi specifici giri tra i piloti esperti.

Analogamente, per i piloti non esperti, sono state eseguite analisi di regressione lineare per esaminare la relazione tra la durata media delle fissazioni in uscita e la velocità nei diversi giri, ma non sono state riscontrate prove di una relazione significativa tra la durata media delle fissazioni in uscita e la velocità per nessuno dei giri effettuati.

Anche sul tempo ci sono prove di una relazione negativa tra la durata media delle fissazioni in uscita e il tempo sui giri, con significatività statistica nei Giri 1, 3, 4, e 5. Questo indica che una maggiore durata delle fissazioni in uscita può essere associata a tempi di giro più brevi per questi giri specifici (Tabella 32).

(tabella 32) *analisi di regressione lineare (durata fissazioni uscita curva 1/tempo sul giro)*

<b>Esperienza</b>	<b>Giro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valore p</b>
Esperti	0	0.007	0.73
<b>Esperti</b>	<b>1</b>	<b>-0.034</b>	<b>0.036</b>

Esperti	2	-0.038	0.33
<b>Esperti</b>	<b>3</b>	<b>-0.026</b>	<b>0.009</b>
<b>Esperti</b>	<b>4</b>	<b>-0.021</b>	<b>0.033</b>
<b>Esperti</b>	<b>5</b>	<b>-0.025</b>	<b>0.003</b>
Non Esperti	0	0.025	0.36
Non Esperti	1	0.002	0.90
Non Esperti	2	0.006	0.62
Non Esperti	3	0.008	0.44
Non Esperti	4	0.005	0.69
Non Esperti	5	0.005	0.63

Analizzando il pattern visivo tra piloti esperti e non esperti durante le fissazioni in curva 1, emergono chiare differenze nell'approccio alla guida. All'ingresso della curva 1, i piloti meno esperti mostrano un numero significativamente maggiore di fissazioni rispetto ai loro omologhi esperti. Questo suggerisce che i piloti non esperti potrebbero sentirsi meno sicuri o più incerti durante la fase di avvicinamento alla curva, il che li porta a monitorare più frequentemente l'ambiente stradale. D'altra parte, i piloti esperti mantengono un numero inferiore di fissazioni, indicando una maggiore capacità di anticipare la strada e adottare strategie di guida più fluide.

Anche all'uscita della curva, si osserva un modello simile. I piloti non esperti continuano a mostrare un numero maggiore di fissazioni, suggerendo una possibile difficoltà nel mantenere una visione anticipatoria mentre escono dalla curva. Al contrario, i piloti esperti, pur mostrando un aumento delle fissazioni rispetto all'ingresso della curva, mantengono comunque un livello inferiore rispetto ai non esperti. Questo indica una maggiore abilità nel gestire la fase critica dell'uscita della curva, mantenendo un controllo efficace del veicolo e una visione più ampia dell'ambiente stradale.

In sintesi, i pattern visivi evidenziano la differenza nell'abilità di elaborazione delle informazioni visive e nell'adozione di strategie di guida tra i due gruppi. Gli esperti dimostrano una maggiore capacità di mantenere una visione stabile e anticipatoria dell'ambiente stradale, riducendo la necessità di fissazioni frequenti e migliorando così la capacità di prendere decisioni rapide e accurate durante la guida in curva.

#### *Blinks*

Anche in curva 1 sono stati misurati gli ammiccamenti prodotti dai piloti. In questo caso è stato possibile ricavare numero e durata degli ammiccamenti sia durante la fase di ingresso curva e sia in uscita curva. Questo ha permesso di effettuare le differenze tra i 2 gruppi in base all'esperienza. I risultati dettagliati delle medie separate per il numero e la durata dei blinks in ingresso e uscita, per i piloti esperti e non esperti sono riportati rispettivamente nella seguente tabella.

(tabella 33) *statistiche descrittive medie Blinks in Curva 1 esperti e non esperti*

<b>BLINKS CURVA 1</b>	<b>Media Esperti</b>	<b>Media Non Esperti</b>	<b>t-statistico</b>	<b>p-value</b>
Numero Blinks Ingresso	1.68	2.38	-1.14	0.269
Durata Blinks Ingresso	140.20	135.99	0.14	0.893
Numero Blinks Uscita	0.60	1.33	-1.68	0.110
Durata Blinks Uscita	85.42	110.47	-0.82	0.426

I risultati mostrano che non ci sono differenze statisticamente significative in nessuna delle categorie testate tra i piloti esperti e non esperti, dato che tutti i p-value sono ben al di sopra della soglia convenzionale di 0.05. inoltre non sono emerse differenze significative tra i due gruppi in nessuno dei giri effettuati sia per il numero che per la durata dei blinks, in ingresso e uscita curva 1.

Per verificare se il numero e la durata dei Blinks in ingresso e in uscita potessero in qualche modo influenzare le prestazioni in termini di tempo e velocità sui vari giri eseguiti dai 20 piloti, è stata condotta una regressione lineare, per valutare la significatività sulle seguenti relazioni.

(tabella 34) *Numero medio dei blinks in ingresso curva su velocità giro tra esperti non esperti*

<b><i>N Blinks in intro/speed</i></b>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>	
	<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<b><i>p</i></b>
Giro 1	<b>0.20</b>	<b>0.002</b>	<b>0.20</b>	<b>0.002</b>
Giro 2	<b>0.18</b>	<b>0.003</b>	<b>0.13</b>	<b>0.009</b>
Giro 3	<b>0.28</b>	<b>0.0005</b>	0.02	0.197
Giro 4	<b>0.15</b>	<b>0.006</b>	<b>0.17</b>	<b>0.004</b>
Giro 5	0.03	0.174	<b>0.05</b>	<b>0.066</b>

(tabella 35) *Numero medio blinks in ingresso curva su velocità giro tra esperti e non esperti*

<i>N Blinks exit/speed</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>		
	Giro	R <sup>2</sup>	p	R <sup>2</sup>	p
1		0.01	0.594	0.00001	0.977
2		0.02	0.256	0.04	0.113
<b>3</b>		<b>0.08</b>	<b>0.030</b>	0.02	0.223
<b>4</b>		<b>0.25</b>	<b>0.001</b>	0.002	0.721
<b>5</b>		<b>0.003</b>	<b>0.662</b>	<b>0.35</b>	<b>0.0002</b>

(tabella 36) *Numero medio blinks ingresso curva su tempo giro tra esperti e non esperti*

<i>N Blinks Entry time lap</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>		
	Giro	R <sup>2</sup>	p	R <sup>2</sup>	p
1		<b>0.21</b>	<b>0.004</b>	<b>0.20</b>	<b>0.002</b>
2		<b>0.17</b>	<b>0.003</b>	<b>0.13</b>	<b>0.009</b>
3		<b>0.36</b>	<b>0.0001</b>	0.03	0.169
4		<b>0.15</b>	<b>0.006</b>	<b>0.17</b>	<b>0.004</b>
5		<b>0.05</b>	<b>0.074</b>	0.05	0.071

(tabella 37) *Numero medio blinks uscita curva su tempo giro tra esperti e non esperti*

<i>N Blinks exit time lap</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>		
	Giro	R <sup>2</sup>	p	R <sup>2</sup>	p
1		0.06	0.490	0.0004	0.866
2		0.02	0.208	0.03	0.165
3		0.10	0.016	0.015	0.299
4		0.23	0.001	0.002	0.687
5		0.006	0.491	0.32	0.0003

(tabella 38) *Durata media blinks ingresso curva su velocità giro tra esperti non esperti*

<i>durata Blinks entry speed</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>		
	Giro	R <sup>2</sup>	p	R <sup>2</sup>	p
1		0.55	$p < 0.00001$	0.28	0.004
2		0.32	0.0003	0.28	0.0005
3		0.04	0.116	0.02	0.269
4		0.28	0.0005	0.17	0.004
5		0.005	0.534	0.09	0.021

(tabella 39) *Durata media blinks ingresso curva su tempo giro tra esperti non esperti*

<i>durata Blinks entry time</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>	
	Giro	R <sup>2</sup>	p	p
1	0.53	0.00001	0.53	$p < 0.00001$
2	0.33	0.0003	0.33	0.0003
3	0.03	0.128	0.03	0.129
4	0.29	0.0004	0.29	0.0004
5	0.0025	0.665	0.003	0.665

(tabella 40) *Durata media blinks uscita curva su velocità giro tra esperti e non esperti*

<i>durata Blinks exit speed</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>	
	Giro	R <sup>2</sup>	p	p
1	0.021	0.223	0.002	0.717
2	0.045	0.087	0.248	0.001
3	0.087	0.025	0.188	0.003
4	0.151	0.005	0.002	0.717
5	0.411	$p < 0.0001$	0.013	0.337

(tabella 41) *Durata media blinks uscita curva 1 su tempo giro tra esperti e non esperti*

<i>durata Blinks exit time</i>	<b>Esperti</b>		<b>Non Esperti</b>	
	Giro	R <sup>2</sup>	p	p
1	0.012	0.337	0.001	0.741
2	0.040	0.105	0.307	0.0003
3	0.106	0.015	0.170	0.004
4	0.124	0.010	0.005	0.533
5	0.387	0.0001	0.013	0.337

L'analisi delle regressioni lineari basate sul numero e sulla durata dei blink in ingresso e in uscita fornisce un quadro approfondito del comportamento visivo dei piloti di go-kart, sia esperti che non esperti. Ecco una sintesi dei punti chiave:

*Comportamento visivo relativo ai blink durante la curva 1:*

Il numero medio di blink, sia in ingresso che in uscita, è stato esaminato come possibile predittore della velocità e del tempo dei giri. I Risultati sono emersi significativi in alcuni casi, suggerendo che un aumento dei blink potrebbe correlarsi con una maggiore velocità o, in alcuni casi, con tempi di giro più brevi. Questo potrebbe indicare che i piloti aumentano i blink in situazioni di maggiore stress o concentrazione, come l'ingresso e l'uscita dalle curve, dove è richiesta maggiore attenzione. La durata dei blink, soprattutto in uscita dalle curve, ha mostrato alcune correlazioni significative con la velocità e il tempo dei giri. Nei giri in cui la durata dei blink in uscita è maggiore, si è osservata una maggiore velocità, specialmente tra i piloti esperti. Questo suggerisce che i piloti più esperti potrebbero essere più efficienti nel gestire la loro attenzione visiva e nel mantenere il controllo del veicolo anche con una minore frequenza di ammiccamenti.

#### *Differenze tra Piloti esperti e Piloti non esperti:*

I piloti esperti mostrano una maggiore coerenza nell'uso dei blink come strumento di gestione della concentrazione e del carico cognitivo, evidenziato dalla maggiore significatività statistica nelle loro regressioni, sia per il numero che per la durata dei blink.

I piloti non esperti mostrano risultati più variabili, il che potrebbe indicare una minore capacità di gestire in modo ottimale la concentrazione e il carico visivo, specialmente in situazioni di alta velocità o complesse manovre di guida.

Questi risultati evidenziano l'importanza del comportamento visivo nella guida, e come gli esperti tendano ad adattarsi meglio alle esigenze visive richieste durante la guida ad alte prestazioni.

#### *Dilatazione Pupillare*

Sulla base dei dati raccolti, emerge un'analisi delle differenze medie nei diametri delle pupille tra piloti esperti e non esperti durante la guida su kart, con focus sia in ingresso che in uscita della curva. All'ingresso della curva, si osserva che i piloti esperti presentano un diametro medio delle pupille leggermente maggiore (2,941 mm) rispetto ai non esperti (2,924 mm), con una differenza media di 0,017 mm. In contrasto, all'uscita della curva, si evidenzia un'inversione di questa tendenza: i piloti non esperti mostrano un diametro medio delle pupille leggermente maggiore (2,903 mm) rispetto agli esperti (2,867 mm),

con una differenza media di -0,036 mm. Nonostante le differenze siano minime, queste osservazioni suggeriscono la presenza di variazioni sottili nelle risposte fisiologiche dei due gruppi alle condizioni di guida, potenzialmente indicative di differenze nel loro approccio o nel modo in cui gestiscono le varie fasi del percorso.

Per ogni giro effettuato, sono stati calcolati i valori medi dei diametri delle pupille per piloti esperti e non esperti, insieme ai relativi p-value derivanti dal test t. All'ingresso della curva, i risultati mostrano che le medie dei diametri delle pupille per entrambi i gruppi non presentano differenze statisticamente significative in nessuno dei giri considerati, come indicato dai p-value elevati (media esperti: da 2,803 mm a 3,021 mm; media non esperti: da 2,853 mm a 2,965 mm; *p*-value: da 0,711 a 0,986). Analogamente, all'uscita della curva, le medie dei diametri delle pupille per entrambi i gruppi non mostrano differenze statisticamente significative in nessuno dei giri, come evidenziato dai p-value elevati (media esperti: da 2,729 mm a 2,939 mm; media non esperti: da 2,777 mm a 3,012 mm; *p*-value: da 0,581 a 0,934). Pertanto, i dati suggeriscono una consistenza nel comportamento pupillare tra piloti esperti e non esperti durante l'attraversamento della pista, senza differenze statisticamente significative rilevate né all'ingresso né all'uscita della curva.

I risultati delle analisi di regressione condotte indicano alcune considerazioni rilevanti sul ruolo del diametro della pupilla, sia all'ingresso che all'uscita della curva, come potenziale predittore del tempo giro e della velocità giro, sia per piloti esperti che non esperti. I valori di  $R^2$  ottenuti sono stati generalmente bassi in tutte le analisi condotte. Questo suggerisce che il diametro della pupilla, nelle fasi considerate, spiega solo una piccola frazione della variazione nei tempi di giro e nella velocità. Tale constatazione suggerisce che altri fattori, quali le abilità del pilota, le condizioni della pista o altre variabili fisiologiche, potrebbero avere un impatto più significativo su questi parametri. Inoltre, i p-value ottenuti sono stati costantemente elevati, indicando che le correlazioni osservate tra il diametro della pupilla e le variabili di interesse (tempo di giro e velocità) non raggiungono livelli di significatività statistica. Ciò suggerisce che eventuali relazioni osservate potrebbero essere casuali piuttosto che indicative di una relazione sistematica tra le variabili considerate.

È stata effettuata un'analisi delle variazioni nel diametro della pupilla tra l'ingresso e l'uscita della curva 1 durante vari giri al fine di investigare se vi sia affaticamento visivo durante il percorso. Tale cambiamento potrebbe indicare una modifica nel carico cognitivo e visivo, potenzialmente interpretato come segnale di affaticamento oculare o stress. È stata calcolata la differenza tra il diametro della pupilla all'ingresso e all'uscita della curva 1 per ogni giro, al fine di ottenere una misura del cambiamento del diametro della pupilla durante il tracciato.

Successivamente, è stata condotta un'analisi descrittiva delle differenze del diametro della pupilla, includendo statistiche come media, mediana e deviazione standard. Ciò ha permesso di individuare eventuali tendenze nell'incremento o decremento del diametro.

Per determinare se le differenze osservate sono statisticamente significative, è stato utilizzato il test *t* di Student per campioni appaiati (se i dati seguono una distribuzione normale) e il test di Wilcoxon per stabilire se le variazioni nel diametro della pupilla sono probabilmente reali e non dovute al caso.

Successivamente, è stata condotta un'analisi di tendenza nel tempo, esaminando se l'affaticamento visivo aumenta con il numero di giri. Ciò è stato effettuato tramite metodi di regressione o analisi di serie temporali, per comprendere come le differenze nel diametro della pupilla si evolvono durante la sessione di guida.

Infine, per valutare l'influenza dell'esperienza sulla reazione visiva allo stress della curva, sono state confrontate le differenze nel diametro della pupilla tra piloti esperti e non esperti. Tale confronto ha evidenziato eventuali disparità nell'adattamento visivo tra i due gruppi di piloti.

Le analisi delle statistiche descrittive sulle differenze nel diametro della pupilla tra l'ingresso e l'uscita della curva 1 per ciascun giro hanno prodotto i seguenti risultati:

(tabella 42) *statistiche descrittive differenze diametro della pupilla ingresso/uscita della curva 1 per ciascun giro*

<b>Diametro pupillare</b>						
<b>curva 1</b>	<b>Giro 0</b>	<b>Giro 1</b>	<b>Giro 2</b>	<b>Giro 3</b>	<b>Giro 4</b>	<b>Giro 5</b>
Count	20	20	20	20	20	20

Mean	-0.075	-0.078	-0.011	-0.042	-0.031	-0.046
Std	0.304	0.307	0.272	0.328	0.324	0.316
Min	-0.820	-0.770	-0.480	-0.690	-0.600	-0.600
25%	-0.245	-0.260	-0.185	-0.262	-0.280	-0.270
50%	-0.055	-0.025	-0.005	0.070	0.030	-0.070
75%	0.150	0.148	0.243	0.200	0.200	0.190
Max	0.450	0.380	0.490	0.450	0.420	0.560

Le medie, prossime a zero o leggermente negative per tutti i giri, suggeriscono che in media il diametro della pupilla tenda a diminuire leggermente dalla curva di ingresso a quella di uscita. La deviazione standard, significativamente alta in relazione alle medie, evidenzia una variazione considerevole nel cambiamento del diametro della pupilla tra i partecipanti.

Questo fenomeno potrebbe essere indicativo di una variazione nell'affaticamento visivo o nel carico cognitivo durante il percorso della curva.

L'analisi del confronto tra esperti e non esperti riguardo alle differenze nel diametro della pupilla tra ingresso e uscita della curva 1 ha prodotto i seguenti risultati:

il test  $t$  di Student per campioni indipendenti per confrontare le medie delle differenze del diametro della pupilla tra esperti e non esperti, ha restituito una  $t$  di -2.614 e un  $p$ -value di 0.0259.

il valore ottenuto è inferiore al livello di significatività comune di 0.05 suggerisce che vi sono differenze statisticamente significative nelle medie delle differenze del diametro della pupilla tra esperti e non esperti. In particolare, la  $t$  negativa suggerisce che gli esperti potrebbero manifestare minore variazione del diametro rispetto ai non esperti, indicando una potenziale migliore stabilità o meno affaticamento visivo tra i piloti più esperti.

Queste considerazioni suggeriscono che l'esperienza può influenzare la reazione visiva allo stress mentre si affronta la curva, con i piloti esperti che potrebbero manifestare una minore variazione pupillare rispetto ai non esperti. Questo potrebbe riflettere un adattamento o una tolleranza migliore al carico visivo e cognitivo durante la guida.

*Saccadi*

(tabella 43) *Differenze tra i piloti esperti e non esperti, sia per il numero che per durata delle saccadi all'ingresso e all'uscita della curva 1*

Giro	Esperienza	Numero Saccadi Ingresso	Numero Saccadi Uscita	Durata Saccadi Ingresso (ms)	Durata Saccadi Uscita (ms)
0	Esperto	5.8	3.5	66.597	85.807
1	Esperto	2.9	2.4	61.685	82.672
2	Esperto	2.4	2.1	59.961	64.528
3	Esperto	3.1	2.2	44.121	60.760
4	Esperto	3.9	2.5	46.397	82.877
5	Esperto	4.4	9.8	66.566	49.568
0	Non Esperto	6.1	5.1	109.549	93.108
1	Non Esperto	5.3	2.9	109.073	168.383
2	Non Esperto	5.2	3.7	85.653	84.152
3	Non Esperto	4.7	3.5	159.946	64.433
4	Non Esperto	5.3	3.6	112.964	88.070
5	Non Esperto	4.9	3.3	111.309	58.409

Le differenze tra i piloti esperti e non esperti, sia per il numero che per durata delle saccadi all'ingresso e all'uscita della curva 1. Mostra i seguenti risultati statistici:

(tabella 44) *Differenze piloti esperti / non esperti, sia per il numero che per durata delle saccadi all'ingresso e all'uscita della curva 1*

Giro	Tipo di Test	Ingresso/Uscita	Valore t	P-Valore
0	Numero Saccadi	Ingresso	-0.24	0.812
0	Numero Saccadi	Uscita	-1.82	0.086
0	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-1.46	0.176
0	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-0.26	0.799
1	Numero Saccadi	Ingresso	-2.74	<b>0.017*</b>
1	Numero Saccadi	Uscita	-1.08	0.302
1	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-1.75	0.103
1	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-1.57	0.142
2	Numero Saccadi	Ingresso	-3.09	<b>0.007*</b>
2	Numero Saccadi	Uscita	-2.57	<b>0.020*</b>
2	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-1.45	0.168
2	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-0.76	0.458
3	Numero Saccadi	Ingresso	-1.94	0.073
3	Numero Saccadi	Uscita	-2.33	<b>0.032*</b>
3	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-2.53	<b>0.032*</b>

3	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-0.21	0.838
4	Numero Saccadi	Ingresso	-1.73	0.101
4	Numero Saccadi	Uscita	-2.18	<b>0.043*</b>
4	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-1.76	0.109
4	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-0.14	0.894
5	Numero Saccadi	Ingresso	-0.63	0.542
5	Numero Saccadi	Uscita	0.87	0.409
5	Durata Saccadi (ms)	Ingresso	-1.51	0.156
5	Durata Saccadi (ms)	Uscita	-0.46	0.649

I risultati presentati nella tabella riflettono un'analisi dettagliata delle saccadi durante l'approccio di guida in curva 1, l'analisi mostra il comportamento visivo tra piloti esperti e non esperti su sei differenti giri. Dall'analisi emergono alcuni punti di rilievo.

*Analisi statistica:* Dai valori emergono significative differenze nel numero di saccadi tra i due gruppi in alcuni casi, evidenziate da valori di  $p$  (0.017 e 0.007 rispettivamente) che indicano una significativa divergenza nel numero di saccadi all'ingresso per il primo e il secondo giro. Ciò suggerisce un'interazione tra l'esperienza dei piloti e il comportamento visivo in contesti specifici.

*Durata delle Saccadi:* La durata delle saccadi manifesta differenze significative in determinate circostanze, come all'ingresso del terzo giro, dove il p-valore di 0.032 suggerisce una variazione sostanziale tra i gruppi. Questo può riflettere una maggiore capacità degli esperti di elaborare le informazioni visive in modo efficiente, influenzando la durata delle saccadi.

*Giri con Minore Differenza:* Vi sono giri in cui non emergono differenze significative né nel numero né nella durata delle saccadi. Ad esempio, i p-valori relativi al quarto e al quinto giro presentano valori generalmente elevati in entrambe le categorie, indicando che l'esperienza potrebbe non avere un impatto sostanziale sul comportamento visivo in tali circostanze.

*Consistenza tra Ingresso e Uscita:* È rilevante osservare che le differenze tra i piloti sono più pronunciate all'ingresso della curva rispetto all'uscita. Questo potrebbe suggerire una maggiore capacità degli esperti di anticipare e pianificare i movimenti durante l'approccio

alla curva, influenzando il comportamento visivo in modo più significativo in fase di ingresso. Inoltre i valori  $t$  negativi indicano una tendenza dei piloti non esperti a mostrare valori medi superiori rispetto agli esperti per le misurazioni analizzate, suggerendo una maggiore variabilità o una minore ottimizzazione nel comportamento visivo. Al contrario, i valori  $t$  positivi, come osservato nell'uscita del quinto giro per il numero di saccadi, indicano il contrario.

In conclusione, i risultati evidenziano significative disparità nel comportamento visivo tra piloti esperti e non esperti durante l'attraversamento della curva 1. Queste differenze possono essere fondamentali per lo sviluppo di interventi formativi mirati o per il perfezionamento delle strategie di guida. Tuttavia, vi sono anche circostanze in cui l'esperienza sembra non influire in modo significativo, suggerendo l'esistenza di altri fattori che possono modulare il comportamento visivo durante la guida in pista.

Le analisi di regressione condotte per esaminare l'influenza del comportamento visivo dei piloti sulle prestazioni di guida, focalizzandosi sul numero e sulla durata delle saccadi, hanno prodotto osservazioni rilevanti. Di seguito sono riportati i risultati dettagliati e le relative implicazioni.

#### *Numero delle Saccadi (Ingresso e Uscita) come Predittore della Velocità:*

I risultati evidenziano l'assenza di una relazione statisticamente significativa tra il numero di saccadi e la velocità sui vari giri. Questo è supportato da  $p$ -values consistentemente elevati e valori di  $R$ -squared molto bassi. Tale constatazione suggerisce che il numero di saccadi, sia all'ingresso che all'uscita della curva, ha un impatto trascurabile sulla velocità. Si ipotizza che la velocità sia principalmente influenzata da altri parametri di guida, come l'accelerazione, la frenata e le caratteristiche tecniche del veicolo e della pista.

#### *Durata delle Saccadi (Ingresso e Uscita) come Predittore della Velocità:*

Analogamente al numero di saccadi, anche la durata delle saccadi non presenta una correlazione significativa con la velocità. Si presume che la durata delle saccadi abbia un impatto marginale sulla velocità ottimale mantenuta dai piloti, la quale potrebbe essere influenzata da fattori quali la strategia di gara e le condizioni della pista.

### *Numero delle Saccadi (Ingresso e Uscita) come Predittore del Tempo sui Giri:*

Non emerge una relazione significativa tra il numero di saccadi e il tempo di giro. Questo suggerisce che l'efficienza nel completamento dei giri non è direttamente correlata al numero di spostamenti dello sguardo, ma piuttosto alla gestione ottimale della traiettoria e dell'accelerazione/frenata in risposta alle condizioni di guida.

### *Durata delle Saccadi (Ingresso e Uscita) come Predittore del Tempo sui Giri:*

Similmente al numero delle saccadi, la durata delle stesse non mostra una correlazione significativa con il tempo sul giro. Le analisi effettuate dimostrano che né il numero né la durata delle saccadi in curva 1 sono predittori significativi della velocità o del tempo di giro. Questo suggerisce che altri fattori possono incidere sulla performance quali la capacità decisionale dei piloti, la loro esperienza, le condizioni del circuito e le caratteristiche tecniche del veicolo hanno un ruolo preponderante sulle prestazioni di guida rispetto al comportamento visivo misurato attraverso le saccadi. Per una comprensione più approfondita sui pattern visivi legati alle saccadi sarebbe opportuno integrare altri dati relativi al comportamento visivo.

I risultati dell'analisi visiva dei piloti durante la guida sulla curva 1 sono stati approfonditi e distinti per diversi aspetti, inclusi fissazioni, ammiccamenti, dilatazione pupillare e saccadi.

Per quanto riguarda le fissazioni, è emerso che i piloti non esperti hanno mostrato un numero significativamente maggiore di fissazioni all'ingresso e all'uscita della curva rispetto ai piloti esperti. Questo potrebbe indicare una maggiore incertezza o una minore capacità di anticipare la strada tra i piloti meno esperti. Tuttavia, la durata delle fissazioni non è stata significativamente diversa tra i due gruppi, suggerendo che una volta fissato un punto, entrambi i gruppi hanno mantenuto una visione stabile per lo stesso periodo di tempo.

Per quanto riguarda gli ammiccamenti, non sono state trovate differenze significative tra esperti e non esperti, né per il numero né per la durata, né all'ingresso né all'uscita della curva. Questo potrebbe indicare che l'attività degli occhi non è influenzata dall'esperienza durante la guida in curva.

L'analisi della dilatazione pupillare ha mostrato che i piloti esperti tendono a avere una maggiore stabilità nel diametro della pupilla rispetto ai non esperti. Questo potrebbe suggerire una migliore gestione del carico visivo e cognitivo tra i piloti più esperti durante la guida in curva.

Infine, per quanto riguarda le saccadi, è emerso che i piloti non esperti tendono ad avere un numero significativamente maggiore di saccadi all'ingresso e all'uscita della curva rispetto ai piloti esperti. Ciò potrebbe indicare una maggiore irrequietezza o meno fluidità nel movimento degli occhi durante la guida tra i piloti meno esperti.

In generale, l'analisi visiva ha evidenziato differenze significative nell'approccio alla guida in curva 1, con i piloti esperti che mostrano una maggiore stabilità e capacità di anticipazione rispetto ai non esperti.

## 8.2.6 Analisi Curva 9 Esperti/ Non esperti

La curva 9 si presenta un tratto molto tecnico da affrontare, essendo più lunga e lenta rispetto alla curva 1, La sua conformazione si presenta come una (U) rovesciata. E i piloti sono costretti a rallentare per affrontarla nel modo migliore. Per questo motivo grazie alla sua natura ci si aspetta delle differenze dal punto di vista visivo tra piloti mentre l'affrontano. Le medie delle fissazioni hanno notato le seguenti differenze.

(tabella 45) *Statistiche descrittive numero e durata fissazioni ingresso curva 9*

<b>Fissazioni curva 9</b>	<b>N. fissazioni ingresso curva 9</b>	<b>Durata media delle fissazioni ingresso curva9 (ms)</b>	<b>N. fissazioni in uscita curva</b>	<b>Durata media delle fissazioni in uscita curva 9 (ms)</b>
Piloti Esperti	4.4 - 6.4	481 - 607	4.7 - 5.1	314 - 365
Piloti Non Esperti	6.2 - 8.5	353 - 504	5 - 6.5	218 - 284

I piloti con più di 5.5 anni di esperienza mostrano un numero inferiore di fissazioni sia in ingresso che in uscita curva rispetto ai loro omologhi meno esperti. Inoltre, i piloti non esperti tendono ad avere una durata media delle fissazioni leggermente più breve sia all'ingresso che all'uscita della curva analizzata., mentre i piloti esperti potrebbero essere più efficaci nel concentrarsi sulle

informazioni rilevanti. Queste rilevazioni sono in linea con le osservazioni precedentemente analizzate in curva 1. Parallelamente, si osserva che i piloti esperti mantengono un numero leggermente inferiore di fissazioni anche durante l'uscita dalla curva, suggerendo una capacità superiore nel prevedere la traiettoria ideale e nel mantenere una visione più fluida.

Infine, i piloti meno esperti presentano una durata media delle fissazioni leggermente più breve durante l'uscita dalla curva rispetto ai piloti esperti. Questo potrebbe indicare uno sguardo più disorientato e cauto nell'affrontare l'uscita curva, mentre i piloti con una esperienza maggiore sono in grado di valutare rapidamente le condizioni e di prendere decisioni tempestive con durate più lunghe. Questi dati suggeriscono che i piloti esperti adottano un approccio più efficiente e mirato mentre affrontano la curva 9. Le tabelle mostrano le differenze statistiche tra esperti e non esperti sul numero e durata fissazioni sia in ingresso che uscita curva 9

(tabella 46) *significatività Numero e durata fissazioni ingresso curva 9*

Giro	Numero di fissazioni ingresso		Durata media delle fissazioni ingresso	
	Statistica F	Valore p	Statistica F	Valore p
0	0.4514	0.5102	0.7684	0.392
<b>1</b>	<b>49.543</b>	<b>0.0390*</b>	14.770	0.239
2	14.242	0.2482	0.9601	0.340
<b>3</b>	<b>108.835</b>	<b>0.0039*</b>	25.358	0.128
<b>4</b>	<b>210.291</b>	<b>0.0002*</b>	<b>54.705</b>	<b>0.031*</b>
5	0.1544	0.6990	0.5877	0.453

(tabella 47) *significatività Numero e durata fissazioni uscita curva 9*

Giro	Numero di fissazioni uscita		Durata media delle fissazioni uscita	
	Statistica F	Valore p	Statistica F	Valore p
0	1.503	0.236	0.126	0.726
1	3132	0.094	1.064	0.316
2	0.870	0.363	0.261	0.616
3	3.032	0.099	3.032	0.099
4	3.008	0.100	0.505	0.486
<b>5</b>	<b>7.837</b>	<b>0.012*</b>	7.837	0.012

Le tabelle presentano le differenze statistiche riscontrate tra individui esperti e non esperti riguardo al numero e alla durata delle fissazioni sia all'ingresso che all'uscita della curva 9.

L'analisi delle fissazioni all'ingresso della curva 9 evidenzia variazioni significative tra piloti esperti e non esperti. Durante il primo giro, gli esperti manifestano un numero significativamente maggiore di fissazioni rispetto ai non esperti ( $F = 49.543$ ,  $p = 0.0390^*$ ), mentre la durata media delle fissazioni non presenta differenze significative ( $F = 14.770$ ,  $p = 0.239$ ). In giri successivi, si registrano aumenti significativi sia nel numero di fissazioni ( $F = 108.835$ ,  $p = 0.0039^*$  per il terzo giro e  $F = 210.291$ ,  $p = 0.0002^*$  per il quarto giro) che nella durata media delle stesse ( $F = 54.705$ ,  $p = 0.031^*$  per il quarto giro). Le differenze tra esperti e non esperti nelle fissazioni all'uscita della curva 9 sono meno pronunciate, tuttavia nel quinto giro si osserva un numero significativamente maggiore di fissazioni tra gli esperti ( $F = 7.837$ ,  $p = 0.012^*$ ).

Per valutare se il numero o la durata delle fissazioni all'ingresso possano predire la velocità sul giro, è stata condotta un'analisi di regressione lineare. I risultati mostrano un R-quadrato di 0.280, indicando che il 28% della variazione nella velocità sul giro è spiegato dalle variabili indipendenti considerate. Il coefficiente per il numero di fissazioni all'ingresso è -1.81, con un p-value di 0.066, suggerendo una tendenza verso la significatività. Il coefficiente per la durata media delle fissazioni all'ingresso è -0.0195, con un p-value di 0.021, indicando significatività statistica al 5%. un'analisi di regressione lineare utilizzando il numero e la durata delle fissazioni in uscita dalla curva 9 come variabili indipendenti per predire la velocità sul giro. Per il numero di fissazioni in uscita dalla curva, il coefficiente è -1.72. Questo indica che, tutte le altre variabili costanti, per ogni unità in più del numero di fissazioni in uscita dalla curva, ci si aspetta una diminuzione di 1.7220 km/h nella velocità sul giro. Tuttavia, il p-value associato a questa variabile è 0.081, suggerendo che non è statisticamente significativo al livello di significatività del 5%.

Per la durata media delle fissazioni in uscita dalla curva, il coefficiente è -0.0296. Ciò indica che, tutte le altre variabili costanti, per ogni millisecondo in più della durata media delle fissazioni in uscita dalla curva, ci si aspetta una diminuzione di 0.0296 km/h nella velocità sul giro. Tuttavia, il p-value associato a questa variabile è 0.131, indicando che non è statisticamente significativo.

*Pattern Visivo dei Piloti Esperti e Non Esperti sul numero e durata fissazioni curva 9.*

L'analisi dei dati indica differenze sostanziali nei pattern visivi osservati tra i piloti esperti e quelli meno esperti durante il percorso della curva 9.

Per quanto riguarda i piloti esperti, emerge una tendenza verso un minor numero di fissazioni sia all'ingresso che all'uscita della curva, il che suggerisce una maggiore capacità di concentrarsi su informazioni critiche e di mantenere una visione più fluida del tracciato. In particolare, durante l'ingresso della curva, gli esperti dimostrano un aumento graduale del numero di fissazioni nei giri successivi, indicando una maggiore abilità nel valutare rapidamente le condizioni della pista e di adattarsi alle variazioni. Tale incremento è accompagnato da un allungamento della durata media delle fissazioni, suggerendo una maggiore precisione nel mantenere lo sguardo sui punti cruciali della traiettoria. Analogamente, durante l'uscita della curva, gli esperti mantengono un numero leggermente inferiore di fissazioni, il che potrebbe riflettere una maggiore capacità di prevedere la traiettoria ottimale e di mantenere uno sguardo stabile e orientato. La durata media delle fissazioni all'uscita della curva potrebbe essere leggermente prolungata per gli esperti, indicando una maggiore sicurezza nella valutazione delle condizioni e nella presa di decisioni istantanee.

D'altro canto, i piloti meno esperti mostrano un comportamento visivo distintivo. Essi tendono ad evidenziare un numero maggiore di fissazioni sia all'ingresso che all'uscita della curva, suggerendo una maggiore incertezza nella focalizzazione sui punti cruciali del tracciato. Durante l'ingresso della curva, i piloti non esperti manifestano un aumento significativo del numero di fissazioni nei giri successivi, indicando una difficoltà maggiore nel reagire alle variazioni della pista e nell'elaborazione veloce delle informazioni visive. La durata media delle fissazioni all'ingresso della curva potrebbe risultare leggermente abbreviata per i non esperti, il che potrebbe riflettere uno sguardo più cauto e disorientato durante l'affrontare della curva. Anche all'uscita della curva, i non esperti mantengono un numero leggermente maggiore di fissazioni, suggerendo una minore capacità di anticipare la traiettoria ideale e di mantenere uno sguardo stabile e orientato. La durata media delle fissazioni all'uscita della curva potrebbe risultare leggermente ridotta per i non esperti, indicando maggiore incertezza e minore sicurezza nella valutazione delle condizioni e nelle decisioni di guida.

### *Saccadi*

Per quanto riguarda i movimenti saccadici durante la curva 9 sono stati effettuati i seguenti confronti

(Tabella 48) *statistiche descrittive sul numero e durata media delle saccadi curva 9*

<b>Medie per numero e durata delle Saccadi durante l'Ingresso:</b>	<b>Numero di Saccadi (Ingresso)</b>	<b>Durata Media delle Saccadi (ms) (Ingresso)</b>
Piloti Esperti	5.0 - 8.3	50.82 - 66.22
Piloti Non Esperti	6.8 - 8.9	67.63 - 107.82
<b>Medie per numero e durata delle Saccadi durante l'Uscita:</b>	<b>Numero di Saccadi (Uscita)</b>	<b>Durata Media delle Saccadi (ms) (Uscita)</b>
Piloti Esperti	5.1	52.70 - 67.13
Piloti Non Esperti	5.3 - 6.9	86.76 - 111.72

I risultati indicano una significativa disparità nel numero e nella durata media delle saccadi tra i due gruppi di piloti. In particolare, i piloti esperti manifestano un numero inferiore di saccadi, variando da 5.0 a 8.3 per giro, rispetto ai non esperti, il cui intervallo si attesta tra 6.8 e 8.9 per giro. Analogamente, la durata media delle saccadi all'ingresso della curva è sostanzialmente più breve per gli esperti, oscillando tra 50.82 e 66.22 millisecondi, rispetto ai non esperti, il cui intervallo va da 67.63 a 107.82 millisecondi. Anche durante l'uscita dalla curva, emerge una marcata differenza nel comportamento visivo tra i due gruppi di piloti. Gli esperti mantengono un numero di saccadi più contenuto rispetto ai non esperti, con una media di circa 5.1 saccadi per giro, mentre per i non esperti tale numero varia da 5.3 a 6.9 per giro. Inoltre, la durata media delle saccadi durante l'uscita della curva è significativamente inferiore per gli esperti, con valori compresi tra 52.70 e 67.13 millisecondi, rispetto ai non esperti, il cui intervallo oscilla tra 86.76 e 111.72 millisecondi.

I test di significatività statistica condotti evidenziano differenze statisticamente significative tra esperti e non esperti in specifici giri, sottolineando che tali discrepanze non sono casuali ma riflettono effettive disparità nell'approccio visivo durante l'affrontare della curva.

(Tabella 49) *significatività statistica sul numero e durata delle saccadi di curva 9 per giro*

Giro	saccadi ingresso	Esperti (media)	Non Esperti (media)	p-value
0	Numero di saccadi	6.2	7.1	0.4585
<b>1</b>	<b>Numero di saccadi</b>	<b>6.1</b>	<b>8.2</b>	<b>0.0149*</b>
2	Numero di saccadi	6.2	7.4	0.3315
3	Numero di saccadi	7.0	8.9	0.1762
<b>4</b>	<b>Numero di saccadi</b>	<b>5.0</b>	<b>8.0</b>	<b>0.0242*</b>
5	Numero di saccadi	8.3	6.8	0.5046
<b>0</b>	<b>Durata media saccadi (ms)</b>	<b>50.82</b>	<b>107.82</b>	<b>0.0352*</b>
1	Durata media saccadi (ms)	62.02	85.51	0.3976
2	Durata media saccadi (ms)	55.12	83.77	0.1691
3	Durata media saccadi (ms)	58.12	67.63	0.6043
4	Durata media saccadi (ms)	66.22	75.90	0.6319
5	Durata media saccadi (ms)	59.69	91.09	0.2642

Giro	saccadi uscita	Esperti (media)	Non Esperti (media)	p-value
0	Numero di saccadi	5.0	6.0	0.3324
1	Numero di saccadi	5.3	6.2	0.3068
2	Numero di saccadi	5.1	5.3	0.8139
3	Numero di saccadi	5.1	6.9	0.1244
4	Numero di saccadi	5.0	5.8	0.4404
<b>5</b>	<b>Numero di saccadi</b>	<b>5.1</b>	<b>6.8</b>	<b>0.0091</b>
<b>0</b>	<b>Durata media saccadi (ms)</b>	<b>53.52</b>	<b>91.19</b>	<b>0.0170</b>
1	Durata media saccadi (ms)	57.52	92.91	0.1095
<b>2</b>	<b>Durata media saccadi (ms)</b>	<b>52.70</b>	<b>111.72</b>	<b>0.0133</b>
3	Durata media saccadi (ms)	66.63	101.00	0.3230
4	Durata media saccadi (ms)	61.67	86.76	0.2173
5	Durata media saccadi (ms)	67.13	97.43	0.2587

In conclusione, i piloti esperti si distinguono per un comportamento visivo più efficace e coordinato, caratterizzato da un numero ridotto e una durata minore delle saccadi sia all'ingresso che all'uscita dalla Curva 9, rispetto ai piloti non esperti. Tale differenziazione suggerisce una forte correlazione tra l'esperienza di guida e la capacità di gestire in modo ottimale il monitoraggio visivo durante la guida ad alte prestazioni.

Per valutare la significatività delle differenze tra piloti esperti e non esperti riguardo al numero e alla durata delle saccadi durante l'ingresso e l'uscita dalla Curva 9, sono stati condotti test ANOVA per ciascuna variabile relativa alle saccadi. All'Ingresso l'analisi

rivela che vi sono differenze statisticamente significative tra i due gruppi di piloti in alcuni specifici giri. In particolare, per il numero di saccadi, i giri 1 e 4 mostrano valori di F-statistic significativi ( $p = 0.0147$  e  $p = 0.0234$  rispettivamente), indicando divergenze sostanziali nel comportamento visivo tra esperti e non esperti durante l'ingresso in tali giri. Per quanto riguarda la durata media delle saccadi, il giro 0 presenta una significatività statistica ( $p = 0.0248$ ). All'Uscita analogamente, per le saccadi durante l'uscita, il giro 5 mostra un significativo divario nel numero di saccadi ( $p = 0.0091$ ). Inoltre, per la durata media delle saccadi, i giri 0 e 2 presentano significative differenze tra esperti e non esperti ( $p = 0.0131$  e  $p = 0.0091$  rispettivamente). L'analisi evidenzia che vi sono divergenze significative nel comportamento delle saccadi tra piloti esperti e non esperti durante l'ingresso e l'uscita dalla Curva 9. È importante notare che durante il giro di warm-up, entrambi i gruppi manifestano un aumento nel numero di saccadi, suggerendo una strategia più ampia di monitoraggio visivo. Tuttavia, non emergono differenze significative nel numero di saccadi tra i due gruppi durante questo giro, indicando una simile strategia di esplorazione visiva. Tale considerazione contestuale enfatizza l'importanza del contesto e delle prassi comuni durante le fasi di preparazione in pista.

### *Blinks*

In entrambi gli ingressi e le uscite dalla Curva 9, i non esperti mostrano un numero significativamente maggiore di blinks rispetto agli esperti, con una differenza media di circa 1 blink/giro. Inoltre, la durata media dei blinks è significativamente più lunga per i non esperti rispetto agli esperti, con differenze che vanno da 53 ms a 60 ms. Tutte queste differenze sono statisticamente significative con valori di  $p < 0.05$ , indicando che i comportamenti osservati non sono casuali ma riflettono variazioni reali tra i due gruppi.

(tabella 50) *Statistiche descrittive curva 9 esperti e non esperti blinks curva 9*

<b>Curva 9</b>	<b>Esperti</b>	<b>Non Esperti</b>	<b>Differenza Media</b>	<b>p-value</b>	<b>Significatività</b>
<b>Numero di Blinks</b>					
Ingresso Curva	1.8	2.8	1	$p = 0.0037$	$p < 0.05$
Uscita Curva	1.7	2.9	1.2	$p = 0.00025$	$p < 0.001$
<b>Durata dei Blinks</b>					
Ingresso Curva	124	177	53	$p = 0.00073$	$p < 0.001$
Uscita Curva	123	183	60	$p = 0.0000011$	$p < 0.001$

Analizzando i risultati delle analisi di regressione condotte su entrambi i gruppi, esperti e non esperti, emerge un quadro complesso riguardante l'efficacia dei predittori selezionati nel determinare il tempo impiegato sui giri.

Nel caso degli esperti, il coefficiente di determinazione  $R^2$  adattato è stato calcolato a 0.271, con un  $F= 1.834$  e un valore  $p$  corrispondente di 0.260. Tuttavia, i valori di  $p$  associati ai coefficienti indicano che nessuno dei predittori ha un'associazione statisticamente significativa con il tempo impiegato sui giri.

Per quanto riguarda i non esperti, il coefficiente di determinazione  $R^2$  adattato è leggermente inferiore, pari a 0.160, con un  $F= 1.188$  e un valore  $p$  corrispondente di 0.402. Anche in questo caso, nessuno dei coefficienti raggiunge un livello di significatività statistica, indicando che i predittori non sono in grado di spiegare in modo significativo la variazione nel tempo impiegato sui giri per questo gruppo.

Interessante notare che, sebbene il modello per gli esperti mostri un  $R^2$  adattato leggermente superiore, ciò non si traduce in una maggiore significatività statistica dei predittori rispetto al modello per i non esperti. Dalle analisi non possiamo confermare che il numero e la durata dei blink, sia all'ingresso che all'uscita dalla curva, siano predittori significativi del tempo impiegato sui giri, data la mancanza di significatività statistica dei coefficienti nei modelli analizzati.

### *Diametro della pupilla*

Le analisi condotte sulla dilatazione pupillare hanno rivelato che, mentre i piloti non esperti presentavano una dilatazione media della pupilla di 3.093 mm, i piloti esperti registravano una dilatazione media di 2.972 mm. Questa sottile disparità nel diametro medio della pupilla suggerisce la possibilità che i piloti meno esperti abbiano reagito in modo più accentuato al carico di stress o alla necessità di concentrazione durante la guida, rispetto ai loro omologhi più esperti.

Per questo parametro Sono state effettuate analisi approfondite per valutare eventuali differenze nella dilatazione pupillare tra piloti esperti e non esperti. Inizialmente, sono stati condotti test di normalità per entrambi i gruppi, seguiti da un controllo

sull'uguaglianza delle varianze tra i due gruppi. Successivamente, è stato eseguito il test U di Mann-Whitney per confrontare le medie dei diametri pupillari tra i due gruppi.

Il risultato del test di normalità ha mostrato che i dati del gruppo degli esperti non seguono una distribuzione normale (statistica = 0.887,  $p$ -value < 0.0001), mentre i dati dei non esperti presentano una distribuzione normale (statistica = 0.981,  $p$ -value = 0.084). Dato che l'assunzione di normalità non è soddisfatta per il gruppo degli esperti, è stato adottato un approccio non parametrico.

Successivamente, il test di Levene per l'uguaglianza delle varianze ha indicato che non vi è una differenza significativa nelle varianze tra i due gruppi (statistica = 0.286,  $p$ -value = 0.593), consentendo l'applicazione del test U di Mann-Whitney.

L'esecuzione del test U di Mann-Whitney ha rivelato una differenza statisticamente significativa tra le medie dei diametri pupillari degli esperti e dei non esperti ( $p$ -value = 0.0017), indicando che la differenza osservata nella dilatazione pupillare tra i due gruppi non è casuale, ma rispecchia effettivamente una differenza sottostante nei due contesti.

(Tabella 51) *significatività Diametro della Pupilla tra esperti e non esperti curva 09*

<b>Gruppo</b>	<b>Diametro Pupilla (mm)</b>	<b>Shapiro-Wilk Test <math>p</math>-value</b>	<b>Levene test <math>p</math>-value</b>	<b>Test Significatività (Mann-Whitney) <math>p</math>-value</b>
Non Esperti	3.093	0.084	0.593	0.0017
Esperti	2.972	<0.0001	0.593	0.0017

La tabella 51 fornisce i risultati delle analisi condotte sui dati del diametro della pupilla per i piloti non esperti e esperti in diversi giri, hanno fornito le medie del diametro della pupilla per entrambi i gruppi, insieme ai  $p$ -value dei test di normalità di Shapiro-Wilk per valutare la distribuzione dei dati e i  $p$ -value del test U di Mann-Whitney per determinare la significatività delle differenze tra i due gruppi.

(Tabella 52) *I risultati diametro pupilla per i piloti non esperti e esperti curva 9*

<b>Giro</b>	<b>Media Diametro Pupilla Non Esperti (mm)</b>	<b>Media Diametro Pupilla Esperti (mm)</b>	<b>Shapiro <math>p</math>-value Non Esperti</b>	<b>Shapiro <math>p</math>-value Esperti</b>	<b>Mann-Whitney <math>p</math>-value</b>
-------------	--	--	---	---	--

0	30.085	29.415	0.143	0.009	0.379
1	30.940	29.165	0.171	0.006	0.148
2	30.900	29.615	0.583	0.046	0.199
3	31.210	29.940	0.763	0.039	0.223
4	31.450	30.280	0.817	0.040	0.310
5	30.995	29.895	0.244	0.009	0.156

I p-value del test U di Mann-Whitney mostrano che, per alcuni giri, le differenze nel diametro della pupilla tra i due gruppi non sono statisticamente significative, mentre per altri giri, le differenze hanno evidenziato delle significatività. Ciò suggerisce che vi sia una variazione nella dilatazione pupillare tra i due gruppi in diversi contesti di guida. Questi risultati indicano che il diametro della pupilla può variare significativamente tra piloti esperti e non esperti durante la Curva 9. Con alcune differenze che raggiungono una significatività statistica, mentre altre no. Queste variazioni potrebbero essere influenzate da fattori quali la complessità della curva o il livello di difficoltà percepita nell'affrontarla. Per esaminare la varianza della dilatazione pupillare tra piloti esperti e non esperti, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) per ciascun singolo giro, considerando sia l'ingresso sia l'uscita dalla curva 9. I risultati suggeriscono che, nonostante le differenze osservate nei valori medi del diametro della pupilla tra i due gruppi, tali differenze non sono statisticamente significative in termini di variazione.

Per valutare la significatività statistica della relazione tra la dilatazione pupillare e la velocità sul giro, sono stati calcolati i coefficienti di regressione lineare in ciascun modello. I risultati hanno indicato se la pendenza associata alla dilatazione pupillare è statisticamente diversa da zero, suggerendo così un effetto significativo della dilatazione pupillare sulla velocità.

(Tabella 53) *regressione lineare (dilatazione pupillare/velocità)*

Giro	R-squared Non Esperti	R-squared Esperti	P-value Minimo Non Esperti	P-value Minimo Esperti
0	0.434	0.242	<b>0.056</b>	0.180
1	0.283	0.512	0.150	<b>0.031</b>
2	0.140	0.198	0.320	0.335
3	0.070	0.523	0.523	<b>0.028</b>
4	0.113	0.268	0.377	0.153

5	0.216	0.442	0.208	0.056
---	-------	-------	-------	-------

I risultati della regressione lineare indicano una variazione significativa nei coefficienti R-squared e nei p-value minimi tra i diversi giri e tra i gruppi di piloti esperti e non esperti. L'R-squared riflette la proporzione di variazione nella velocità sul giro spiegata dalla dilatazione pupillare, con valori più alti che suggeriscono una maggiore capacità predittiva. I piloti esperti tendono ad avere R-squared più elevati rispetto ai non esperti, indicando una maggiore associazione tra dilatazione pupillare e velocità per gli esperti. I p-value minimi, che indicano la significatività statistica della relazione tra dilatazione pupillare e velocità sul giro, sono inferiori a 0.05 per il Giro 1 e il Giro 3, suggerendo una correlazione statisticamente significativa per almeno uno dei due gruppi di piloti o per entrambi. È interessante notare che il Giro 1 e il Giro 3 sono i giri in cui i piloti tendono a fare il giro più veloce, suggerendo un possibile impatto della dilatazione pupillare sull'abilità di eseguire il giro in modo efficiente o veloce, specialmente sotto stress o alta concentrazione.

I risultati dell'analisi di regressione lineare tra la dilatazione pupillare e i tempi sul giro per i piloti non esperti ed esperti hanno mostrato i seguenti risultati:

*(Tabella 54) regressione lineare (dilatazione pupillare/tempo sul giro)*

Giro	R-squared Non Esperti	R-squared Esperti	P-value Minimo Non Esperti	P-value Minimo Esperti
0	0.527	0.275	<b>0.028</b>	0.147
1	0.351	0.596	0.099	<b>0.015</b>
2	0.158	0.144	0.289	0.463
3	0.084	0.530	0.469	<b>0.026</b>
4	0.131	0.285	0.340	0.139
5	0.229	0.451	0.193	<b>0.053</b>

L'analisi di regressione lineare condotta sulla relazione tra la dilatazione pupillare e i tempi sul giro per i piloti, suddivisi tra non esperti ed esperti, ha fornito risultati significativi. In particolare, per quanto riguarda i piloti non esperti, si è osservato un R<sup>2</sup> di 0.527 nel primo giro, indicando una spiegazione del 52.7% della variazione nella

dilatazione pupillare da parte del tempo sul giro. Questo risultato è accompagnato da un *P-value* di 0.028, evidenziando una significativa relazione tra le due variabili in questo contesto. Per i piloti esperti, il R-squared più elevato è stato osservato nel secondo giro con un valore del 0.596, mentre il *P-value* minimo associato è stato di soli 0.015, confermando la significatività della relazione. Tuttavia, è importante notare che il terzo giro, benché meno rilevante in termini di R-squared, ha presentato un *P-value* minimo di 0.026 per i piloti non esperti e di 0.026 per i piloti esperti, suggerendo una possibile rilevanza pratica di tale giro nell'allenamento, nonostante la minore percentuale di varianza spiegata. In sintesi, i giri 1, 2 e 3 emergono come i più cruciali in termini di analisi, soprattutto nell'ottica dell'allenamento, poiché implicano una forte correlazione tra la dilatazione pupillare e i tempi sul giro, sia per i piloti esperti che per quelli non esperti.

L'analisi della dilatazione pupillare dei piloti, focalizzata su una specifica porzione di curva, ha rivelato differenze significative tra piloti esperti e non esperti, fornendo dati rilevanti sulle loro capacità di gestione dello stress e di concentrazione in momenti critici della guida. Si osserva che la maggiore dilatazione pupillare nei piloti meno esperti, rispetto a quelli più esperti, potrebbe indicare una reazione più intensa allo stress o un maggior carico cognitivo. Questo fenomeno suggerisce che l'esperienza potrebbe giocare un ruolo fondamentale nel modulare tali risposte, con i piloti più esperti che mostrano una minore reattività, probabilmente grazie a una maggiore familiarità con le dinamiche di guida in curva.

L'abilità di mantenere la concentrazione e la calma durante la navigazione in curva può essere decisiva. I piloti esperti, che presentano una dilatazione pupillare inferiore, sembrano beneficiare di una maggiore efficacia nel prendere decisioni rapide e corrette, fattore che riduce il carico cognitivo e ottimizza la gestione della guida in situazioni stressanti.

Questi risultati offrono importanti implicazioni per l'addestramento dei piloti meno esperti. È consigliabile concentrarsi su come affrontare efficacemente le curve difficili, potenziando le tecniche di simulazione di guida e l'allenamento su metodi di rilassamento

e focalizzazione, essenziali per migliorare la performance in questi segmenti critici del percorso.

Studiare la dilatazione pupillare in una specifica curva può anche rivelare come i piloti modifichino il loro pattern visivo per adattarsi a rapidi cambiamenti ambientali. Si presume che i piloti esperti dimostrino strategie visive più efficienti, concentrando l'attenzione sugli elementi cruciali e minimizzando le distrazioni, il che è fondamentale per mantenere traiettorie ottimali e velocità elevate durante la guida in curva.

Inoltre, le fluttuazioni nella dilatazione pupillare osservate nei vari giri potrebbero riflettere l'adattamento dei piloti al focus e alla gestione dello stress a seconda della complessità delle curve affrontate. Questo suggerisce che curve particolarmente impegnative potrebbero richiedere una maggiore attenzione, risultando in una dilatazione pupillare aumentata.

### **8.3.1 Obiettivo dello studio (3) Analisi Esplorativa dei Parametri Oculari durante un Allenamento Prolungato di un Pilota di Go-Kart esperto.**

Il terzo obiettivo della presente ricerca ha focalizzato l'attenzione sull'analisi esplorativa relativa a un pilota di Go-Kart in vista di un programma di allenamento giornaliero. Tale studio mira a indagare gli effetti della fatica visiva sull'attività di allenamento di un pilota di Go-Kart, mediante l'analisi di specifici parametri visivi. Lo scopo esplorativo consiste nell'esaminare se determinati parametri oculari, quali la dilatazione pupillare, il numero e la durata delle fissazioni e dei battiti delle palpebre, possano fungere da indicatori per la presenza di affaticamento visivo in seguito a un prolungato allenamento, composto da quattro sessioni consecutive, svolto durante una singola giornata dedicata all'allenamento. Inoltre, si intende osservare eventuali correlazioni tra tali parametri e le prestazioni del pilota al fine di stimare l'esauribilità delle risorse visive durante l'attività di allenamento.

### **8.3.2 Metodologia**

Al fine di registrare l'attività oculare, il pilota ha indossato l'Eye Tracker Neon montato sotto il casco, per registrare le 4 sedute di allenamento previste. I dati raccolti sono stati successivamente sottoposti ad analisi, con particolare attenzione ai parametri legati ai pattern sulla fatica visiva quali fissazioni, saccadi, blink e diametro pupillare, al fine di individuare considerazioni che possano essere associate alla fatica visiva del pilota di Go-Kart.

### **8.3.3 Analisi statistiche studio Pilota di Go-kart esperto**

Lo studio condotto ha impiegato diverse analisi statistiche al fine di esplorare le relazioni tra i parametri oculari, le prestazioni di guida e le variabili cinetiche del pilota di Go-Kart esperto durante le sessioni di allenamento. In particolare, sono state utilizzate analisi comparative per valutare le variazioni significative tra le sessioni riguardanti la dilatazione pupillare media, il conteggio di fissazioni, il conteggio di blink e la durata media dei blink. Sono state eseguite analisi ANOVA per identificare variazioni significative nella dilatazione pupillare tra le diverse sessioni, fornendo un'indicazione dell'evoluzione dell'impegno cognitivo e dell'attenzione durante l'allenamento. Inoltre, sono state condotte correlazioni tra i parametri oculari e i tempi medi per giro, evidenziando l'associazione tra l'attività visiva, l'attenzione e le prestazioni di guida. Infine, sono state eseguite analisi di correlazione tra le variabili cinetiche misurate attraverso i dati IMU e i tempi medi per giro, rivelando l'importanza del controllo del beccheggio, del rollio e dell'imbardata per ottimizzare le prestazioni in pista. Queste analisi statistiche hanno contribuito a fornire una visione dettagliata delle interazioni complesse tra parametri oculari, prestazioni di guida e variabili cinetiche, offrendo importanti spunti per migliorare le strategie di allenamento e le prestazioni del pilota di Go-Kart.

### **8.3.4 Risultati**

L'analisi condotta si è basata sui parametri misurati durante le varie sessioni, tra cui la dilatazione pupillare media, il conteggio di fissazioni, il conteggio di blink e la durata media dei blink. Questi parametri forniscono un'indicazione dell'impegno cognitivo, dell'attenzione visiva e del possibile affaticamento durante le attività svolte. Tramite

un'analisi comparativa, sono stati esaminati i cambiamenti osservati tra le diverse sessioni al fine di comprendere meglio le dinamiche sottostanti.

(Tabella 55) *medie totali tra sessioni di allenamento pilota singolo*

Sessione	Dilatazione		Conteggio Blinks	Durata Blink (ms)
	Pupillare Media (mm)	Conteggio Fissazioni		
Prima sessione	<b>2.995</b>	1179	310	158.39
Seconda sessione	<b>2.773</b>	1552	827	156.77
Terza sessione	<b>3.101</b>	1665	130	157.57
Quarta sessione	<b>3.514</b>	1579	273	163.71

I risultati dell'analisi evidenziano variazioni significative tra le diverse sessioni in termini di dilatazione pupillare media, conteggio di fissazioni e conteggio di blink.

La dilatazione pupillare media mostra un aumento progressivo dalle prime alla quarta sessione, suggerendo un aumento di questo parametro in vista di un progressivo aumento cognitivo o dell'attenzione durante le attività svolte durante l'arco della giornata. L'analisi ANOVA sulla dilatazione pupillare ha prodotto un valore (F) statisticamente significativo ( $F=18.31$ ,  $p\text{-value}=0.00$ ), indicando variazioni significative nella dilatazione pupillare tra le sessioni.

Per quanto riguarda gli altri parametri, non sono emerse differenze significative. Il conteggio delle fissazioni mostra un aumento progressivo fino alla terza sessione, per poi diminuire nella quarta, suggerendo che il pilota possa essere associato a una maggiore attività visiva nelle prime sessioni seguita da un calo nell'attenzione visiva.

Il conteggio degli ammiccamenti manifesta variazioni tra le sessioni, con un picco nella seconda sessione seguito da una diminuzione nelle sessioni terza e quarta, con la durata media dei blink che rimane relativamente costante tra le sessioni.

Per valutare se il pilota ha subito delle differenze in termini di tempo medio sui giri effettuati nelle rispettive sessioni, sono state eseguite delle correlazioni con gli indici oculari Dilatazione Pupillare Media, con il Conteggio delle Fissazioni, dei Blink. Per valutare possibili effetti nell'arco della giornata. I risultati dei tempi medi per giro indicano un miglioramento progressivo delle prestazioni del pilota durante l'arco della

giornata di prove. In particolare, si osserva una riduzione costante dei tempi medi dei giri dalle sessioni iniziali a quelle finali. Questo suggerisce che il pilota ha acquisito maggiore confidenza con il tracciato e ha ottimizzato le sue prestazioni nel corso delle sessioni di allenamento.

(tabella 56) *tempo medio giri delle 4 sessioni*

<b>Sessione</b>	<b>Tempo Medio Giri (secondi)</b>
Prima sessione	65.0
Seconda sessione	49.5
Terza sessione	48.4
Quarta sessione	47.2

(tabella 57) *correlazioni tra parametri oculari e tempi medi delle sessioni di allenamento*

<b>Parametri oculari</b>	<b>Correlazione</b>
Dilatazione Pupillare Media	-0.323
Conteggio delle Fissazioni	-0.973
Conteggio dei Blink	-0.083
Durata Media dei Blink	-0.254

L'analisi ha evidenziato diverse correlazioni tra i tempi medi dei giri e i parametri misurati durante le sessioni di allenamento. Per la dilatazione pupillare media viene mostrata una correlazione negativa moderata (-0.323) questo suggerisce che un aumento della dilatazione pupillare potrebbe essere associato a tempi medi dei giri più brevi, indicando un possibile aumento dell'attenzione o dell'attivazione durante la guida più veloce.

Il conteggio delle fissazioni presenta una correlazione negativa molto forte di (-0.973) indicando che una maggiore attività visiva, è associata a tempi medi dei giri più brevi. Questo potrebbe indicare una maggiore concentrazione e reattività visiva durante la guida più veloce. Con il conteggio dei blink viene mostrata una correlazione vicina allo zero (-0.083), suggerendo che non vi sia una forte relazione tra il numero di blink e la velocità dei giri. Questo potrebbe indicare che i blink non sono un fattore significativo nell'influenzare i tempi medi dei giri, mentre la durata media dei blink presenta una correlazione negativa moderata (-0.254) suggerendo che una durata più breve dei blink è

associata a tempi medi dei giri più brevi, indicando una maggiore reattività visiva durante la guida più veloce.

L'analisi delle correlazioni tra le medie delle metriche dei dati IMU (Inertial Measurement Unit) e i tempi medi dei giri per ciascuna sessione fornisce importanti indicazioni sull'associazione tra le variabili cinetiche del pilota durante gli allenamenti giornalieri. Queste informazioni sono essenziali per comprendere il comportamento della testa del pilota lungo gli assi di riferimento durante le diverse sessioni in pista: l'imbardata sull'asse Y, il beccheggio sull'asse X e il rollio sull'asse Z. Questi dati possono essere preziosi per individuare eventuali correzioni posturali che potrebbero migliorare le prestazioni cronometriche in pista.

(tabella 58) *correlazioni dati IMU con i tempi medi giro per sedute*

<b>Metrica</b>	<b>Correlazione con Tempo Medio per Giro</b>
Gyro X (deg/s)	-0.766
Gyro Y (deg/s)	-0.406
Gyro Z (deg/s)	0.949
Accelerazione X (G)	-0.948
Accelerazione Y (G)	-0.072
Accelerazione Z (G)	-0.946

Basandoci sui dati di correlazione forniti:

**Gyro X (deg/s):** Presenta una forte correlazione negativa (-0.766) con il tempo medio per giro. Ciò suggerisce che una minore velocità di rotazione lungo l'asse X del giroscopio è associata a tempi medi per giro più brevi. Pertanto, interventi mirati per ridurre il beccheggio potrebbero contribuire a migliorare le prestazioni in pista.

**Gyro Y (deg/s):** Mostra una correlazione negativa moderata (-0.406) con il tempo medio per giro. Sebbene meno significativa rispetto all'asse X, questa correlazione suggerisce comunque che ridurre l'imbardata potrebbe influenzare positivamente le prestazioni di guida.

**Gyro Z (deg/s):** Presenta una correlazione positiva molto forte (0.949) con il tempo medio per giro. Ciò indica che una maggiore velocità di rotazione lungo l'asse Z del giroscopio

è associata a tempi medi per giro più lunghi. Pertanto, ridurre il rollio potrebbe essere un'area di intervento per migliorare le prestazioni.

Accelerazione X (G): Mostra una forte correlazione negativa (-0.948) con il tempo medio per giro. Questo suggerisce che una minore accelerazione lungo l'asse X è associata a tempi medi per giro più brevi, indicando che migliorare la stabilità laterale potrebbe portare a migliori prestazioni in pista.

Accelerazione Y (G): Presenta una correlazione molto debole (-0.072) con il tempo medio per giro, indicando una scarsa associazione tra l'accelerazione lungo l'asse Y e le prestazioni di guida.

Accelerazione Z (G): Mostra una forte correlazione negativa (-0.946) con il tempo medio per giro. Questo suggerisce che una minore accelerazione verso il basso (asse Z) è associata a tempi medi per giro più brevi, indicando che migliorare la stabilità verticale potrebbe influenzare positivamente le prestazioni in pista.

L'analisi delle variabili cinetiche misurate sugli assi X, Y e Z rivela diverse associazioni con i tempi medi per giro sul circuito. Particolarmente evidente è la forte correlazione negativa tra la velocità di rotazione e l'accelerazione sull'asse X; si deduce quindi che riducendo il beccheggio e aumentando la stabilità laterale si possono ottenere tempi di giro ridotti, migliorando di conseguenza le prestazioni in pista. Al contrario, esiste una marcata correlazione positiva tra i tempi medi per giro e la velocità di rotazione sull'asse Z (Gyro Z), indicando che una riduzione del rollio potrebbe beneficiare le prestazioni. Le correlazioni di intensità moderata si osservano per la velocità di rotazione sull'asse Y, suggerendo che diminuire l'imbardata potrebbe migliorare le prestazioni di guida. È inoltre rilevante notare come l'accelerazione sull'asse Y presenti una correlazione molto debole con i tempi medi per giro, mostrando una limitata influenza di questa variabile sulle prestazioni di guida. Infine, una forte correlazione negativa tra il tempo medio per giro e l'accelerazione verticale (Accelerazione Z) implica che migliorare la stabilità verticale possa avere un impatto positivo sulle prestazioni in pista.

L'analisi condotta in questo studio ha offerto una visione dettagliata e complessa dell'interazione tra parametri oculari e prestazioni di guida in un pilota di Go-Kart esperto

durante un'intensa sessione di allenamento. L'indagine esplorativa dei parametri oculari ha evidenziato significative variazioni che riflettono sia gli effetti dell'affaticamento visivo sia l'adattamento cognitivo a stimoli prolungati e intensi.

La progressiva dilatazione pupillare, che aumenta con il passare delle sessioni, indica un crescente impegno cognitivo e un maggiore livello di attenzione, che potrebbe segnalare un incremento della fatica visiva, ma anche un adattamento del pilota alle condizioni di guida. Questo fenomeno è particolarmente significativo, poiché suggerisce una lotta tra la crescente fatica e la capacità del pilota di adattarsi per mantenere prestazioni elevate.

Un altro aspetto rilevante emerso dall'analisi è la variabilità dell'attenzione visiva, come mostrato dall'aumento e successiva diminuzione del conteggio delle fissazioni. Questo modello potrebbe indicare che il pilota ha sperimentato un picco di attività visiva, seguito da un calo nell'attenzione o una maggiore efficienza nella gestione visiva, a causa della familiarizzazione con il tracciato.

Nonostante il potenziale aumento della fatica, la stabilità osservata nei blink e nella loro durata suggerisce una costanza nelle risposte oculari riflesse del pilota. Inoltre, le correlazioni tra i parametri oculari e i tempi di giro evidenziano che l'impegno visivo e l'attenzione sono strettamente legati alle prestazioni di guida, con tempi di giro più brevi associati a maggiori livelli di attivazione e concentrazione.

L'analisi delle variabili cinetiche attraverso i dati IMU ha ulteriormente confermato l'importanza del controllo del beccheggio, del rollio e dell'imbardata per ottimizzare le prestazioni. La necessità di migliorare la stabilità verticale e laterale per ridurre i tempi per giro è emersa come un fattore chiave.

Questi risultati portano a riflessioni importanti per la formazione e la preparazione dei piloti di Go-Kart e suggeriscono che il monitoraggio dei parametri oculari può essere cruciale per sviluppare protocolli di allenamento che ottimizzino le prestazioni, minimizzando la fatica visiva. Studi futuri potrebbero indirizzare interventi specifici per gestire l'affaticamento cognitivo e visivo e testare l'efficacia di varie strategie di riposo e recupero durante sessioni di allenamento intensivo.

## 8.4 Discussione

Questa ricerca esplorativa ha presentato interessanti spunti riguardanti l'analisi visiva nel contesto del karting, fornendo un'idea dell'analisi visiva del pilota di go-kart durante il suo percorso di allenamento, sia in condizioni normali che avverse di pista. Ciò è stato reso possibile grazie alla validità scientifica dimostrata dall'utilizzo dell'eye tracker Eye Pupil Neon. Questo strumento ha fornito indicazioni utili per l'analisi, confermando l'utilità dei parametri derivati dal dataset ricavato. Evidenziando la sua efficacia scientifica in un ambito particolare come il Karting. Tale approccio ha consentito di rilevare risultati affidabili in un contesto altamente dinamico per valutare le capacità visive essenziali di un pilota di go-kart, rispettando il ruolo della visione nell'ambiente durante gli allenamenti e le gare in pista. L'utilizzo dell'eye tracker Neon della Pupil Labs ha permesso di delineare con precisione le variazioni nei comportamenti oculari del pilota in diverse condizioni di pista, sia asciutta che bagnata, evidenziando l'influenza di tali condizioni sulla capacità di guida e sulla gestione cognitiva del carico di lavoro. Le analisi delle coordinate  $x$  e  $y$  dello sguardo hanno rivelato differenze significative nell'orientamento dello sguardo tra le due condizioni testate. In particolare, si è notato che in condizioni bagnate i piloti tendono a elevare lo sguardo più frequentemente rispetto alle condizioni asciutte. Nelle condizioni di pista bagnata, i piloti di go-kart devono adattare la loro guida per gestire la minore aderenza. Questo include cambiamenti nella scelta della traiettoria, nella tecnica di frenata e nell'uso dell'acceleratore per evitare lo slittamento e mantenere il controllo del kart. La traiettoria ottimale in condizioni bagnate spesso non segue la linea di corsa asciutta tradizionale, ma può spostarsi verso l'esterno della pista dove l'acqua è meno accumulata e l'aderenza può essere leggermente migliore. Anche la vista segue un adattamento in quanto i piloti tendono di anticipare eventuali ostacoli o cambiamenti della superficie stradale, in condizioni di umidità si è visto come i conducenti in situazioni di guida simulata con ostacoli su strada come rotonde o tornanti possano influenzare le strategie visive. I risultati hanno evidenziato come l'azimuth e l'elevation modificati in condizioni bagnate suggeriscono cambiamenti nell'attenzione visiva. Perché stato visto come per massimizzare la sicurezza e la reattività in risposta a un ambiente più sfidanti i conducenti di auto e in questo caso piloti sportivi modifichino il loro sguardo in situazioni critiche, influenzando azimuth e elevation per migliorare la

percezione della strada e della sicurezza durante la guida (Cao et al., 2020; Zang et al., 2021). La ricerca ha anche evidenziato come le condizioni bagnate influenzino la durata e la frequenza delle saccadi e delle fissazioni. La maggiore ampiezza delle saccadi in condizioni bagnate riflette la necessità di un'esplorazione visiva più ampia per compensare la ridotta visibilità e la maggiore incertezza dell'ambiente. Questa teoria è in linea con le ricerche passate dove è stato evidenziato come il comportamento visivo dei guidatori in condizioni di visibilità ridotta subiscono cambiamenti significativi nel numero e nella durata delle fissazioni portando a un adattamento del comportamento visivo diverso (Wang et al 2016). Le modifiche nel comportamento visivo durante la risoluzione di compiti complessi in ambienti reali, evidenzia un aumento della durata delle fissazioni e una riduzione dell'ampiezza delle saccadi. Portando a una maggiore concentrazione e un dettagliato esame visivo, anche in condizioni di meteo avverse (Guo et al., 2024). Questo comportamento risulta inverso con gli scenari di guida asciutta, dove gli spostamenti oculari sembrano essere più focalizzati e ristretti, probabilmente a causa di una maggiore prevedibilità delle condizioni della pista. Uno studio sul tracciamento oculare per comprendere la dinamica del comportamento naturale dello sguardo nello sport ha evidenziato come i movimenti oculari possono essere cruciali per le prestazioni, con schemi di sguardo focalizzati e ristretti andando a migliorare il controllo predittivo e la pianificazione motoria come visto nello studio condotto Kredel nel (2017).

Significative sono le osservazioni riguardanti la frequenza e la durata degli ammiccamenti. Le condizioni asciutte hanno mostrato una frequenza maggiore di ammiccamenti rispetto a quelle bagnate, il che indica un maggior carico percettivo e cognitivo in un contesto apparentemente meno impegnativo. I risultati sono in linea con gli studi condotti sugli ammiccamenti dove è stato dimostrato che l'aumento della frequenza degli ammiccamenti può indicare un carico cognitivo temporaneamente aumentato in compiti che richiedono elevata attenzione e concentrazione (Nomura & Mruno, 2019). Questo fenomeno potrebbe essere spiegato dalla necessità di mantenere una vigilanza costante e un'elevata attenzione in condizioni di guida "standard". In contrasto, la maggiore durata degli ammiccamenti in condizioni bagnate potrebbe

riflettere tentativi del pilota di gestire meglio la fatica visiva e lo stress, chiudendo più a lungo gli occhi per riposarli brevemente da un ambiente più stressante e faticoso.

Questo studio illustra chiaramente come le variazioni ambientali influenzano non solo la performance fisica ma anche quella cognitiva e visiva dei piloti di go-kart. Le evidenze suggeriscono che i piloti devono adattare le loro strategie visive in risposta alle condizioni della pista, modificando la frequenza e la durata delle loro azioni oculari per ottimizzare la percezione e la sicurezza. Nel mondo della sicurezza stradale è stato visto come i conducenti modificano la loro attenzione visiva e le transizioni dello sguardo in base alle diverse esigenze cognitive imposte dal compito di guida. Questo implica che in ambienti di guida complessi, i conducenti devono adattare rapidamente la loro focalizzazione visiva per gestire efficacemente le informazioni in arrivo (Ma et al., 2020). Nel mondo del kart queste evidenze spiegano l'esigenza di intervenire con programmi di intervento che vadano a preparare i piloti anche in base alle variazioni visive e cognitive che si presentano in base alle condizioni variabili che si presentano in pista, potenziando le loro capacità di adattamento e risposta. Nel secondo obiettivo dedicato alla verifica del livello di expertise tra piloti di Go kart sono stati condotti dei confronti per individuare pattern visivi e identificare cluster tra i gruppi. In passato autori hanno supportato l'ipotesi secondo cui i piloti esperti hanno una maggiore efficienza nel processamento visivo, caratterizzato da fissazioni più lunghe ma meno frequenti rispetto ai novizi. Questo indica una capacità superiore di mantenere la concentrazione e minimizzare le distrazioni, ottimizzando l'elaborazione delle informazioni cruciali durante le fasi di conduzione. Si è visto come i piloti di aerei mostrano strategie di scansione visiva più efficienti in cabina di pilotaggio rispetto ai novizi. Gli esperti sono in grado di concentrarsi più efficacemente sulle informazioni rilevanti, il che è coerente con la nostra ipotesi dove gli esperti elaborano le informazioni visive più efficientemente (Lounis et al., 2021). I risultati ottenuti dall'analisi degli indici oculari misurati hanno evidenziato differenze significative nel comportamento visivo. Queste differenze forniscono un'importante comprensione delle capacità visive in relazione all'esperienza di guida, offrendo implicazioni utili per l'addestramento in pista. Dal protocollo di indagine è stato osservato che i piloti esperti presentano un numero inferiore di fissazioni e saccadi rispetto ai non esperti, con una durata media delle fissazioni maggiore. Questo aspetto è molto

interessante in quanto è correlato a un carico di lavoro aumentato. questa relazione è stata trovata in: compiti di memoria di identificazione del bersaglio (Van Orden et al., 2001), compiti di guida pericolosa (Underwood et al., 2002), e compiti di volo simulato (Yang et al., 2014). Sono state fatte alcune altre interpretazioni più vicine all'ipotesi di partenza sul fatto che fissazioni più lunghe potrebbero indicare un'elaborazione più profonda, o strategie più efficienti durante stimoli in rapido movimento (Breslow et al., 2014). Rilevando una maggiore efficienza nel processare le informazioni visive, permettendo ai piloti esperti di assimilare le informazioni dell'ambiente circostante in modo rapido e sostenuto. La ridotta frequenza e l'aumentata durata delle fissazioni indicano una capacità superiore di mantenere una concentrazione più elevata, minimizzando distrazione e ottimizzando l'elaborazione delle informazioni cruciali durante la guida (Menekse Dalveren & Cagiltay, 2020). I risultati sono interpretabili anche in base alle differenze in termini di gestione del carico cognitivo durante la guida. i piloti non esperti tendono a effettuare un numero maggiore di ammiccamenti (blinks). La tendenza ottenuta è particolarmente rilevante in contesti di guida ad alta velocità, dove una gestione efficiente della fatica visiva è cruciale per mantenere prestazioni ottimali. Questo parametro può benissimo essere utilizzato per stimare il carico di stress e fatica, come dimostrato recentemente da uno studio che ha evidenziato come i movimenti oculari possano essere utilizzati per prevedere la fatica nei piloti, evidenziando che esistono correlazioni diverse tra le misure di vigilanza psicomotoria e i movimenti oculari a seconda dell'esperienza del pilota (Naeeri et al., 2021). I risultati ottenuti suggeriscono che modelli predittivi specifici possono essere sviluppati per rilevare la fatica basandosi su misurazioni oculari, il che potrebbe indicare una maggiore frequenza di ammiccamenti nei novizi rispetto agli esperti come segnale crescente di fatica, I risultati di diversi studi hanno mostrato una correlazione positiva significativa tra la frequenza di ammiccamento e il carico di lavoro suggerendo che l'ammiccamento può essere un indicatore di affaticamento mentale affidabile(Benedetto et al 2011; Xu., et al., 2018). Inoltre, è emerso che un numero maggiore di ammiccamenti può correlarsi negativamente con la performance, suggerendo che frequenti interruzioni nella concentrazione visiva possono avere un impatto deleterio sui tempi di giro. Gli ammiccamenti non sono gli unici dati Che forniscono una differenza in termini di expertise e performance in pista. Dalle correlazioni è emerso che una

maggiore frequenza di saccadi è associata a tempi di percorrenza più brevi, dimostrando che una rapida acquisizione delle informazioni visive possa essere vantaggiosa in termini di performance in pista. della ricerca in particolare, è stato riscontrato che le ampiezze saccadiche medie più piccole indicano inefficienza di ricerca (Goldberg & Kotval, 1999) e possono indicare una maggiore difficoltà di ricerca (Zelinsky & Sheinberg, 1997). Tuttavia, ampiezze maggiori delle saccadi potrebbero anche semplicemente indicare che l'attenzione viene attirata meglio a distanza (Goldberg et al., 2002; Inamdar & Pomplun, 2003) risultati hanno mostrato che i piloti esperti tendono a effettuare meno saccadi rispetto ai non esperti, ma con durate maggiori. Questo suggerisce che i piloti esperti sono capaci di raccogliere e processare le informazioni necessarie con pochi e mirati movimenti oculari. La minor frequenza di saccadi nei piloti esperti potrebbe indicare una maggiore efficienza nel mantenere la focalizzazione visiva su elementi cruciali dell'ambiente, permettendo loro di anticipare e reagire più efficacemente alle dinamiche di guida. Il numero e la durata delle saccadi possono avere implicazioni dirette sulla performance di guida, influenzando la capacità di un pilota di navigare rapidamente e con precisione attraverso le curve e i rettilinei del circuito. Nei piloti non esperti, una frequenza più alta di saccadi riflette una ricerca visiva meno efficiente, con un bisogno maggiore di riconferma visiva delle informazioni lungo il percorso, che potrebbe distrarlo nel mantenere le traiettorie ottimali. Queste risultanze sulle saccadi sono ampiamente in linea con le evidenze in letteratura in quanto viene riportato come un parametro essenziale per acquisire le informazioni visive necessarie per guidare in modo efficiente (Schmitt et al., 2015). Difatti i risultati mostrano correlazioni significative tra il numero di saccadi e vari parametri di performance, come la velocità e il tempo di giro. In particolare, si nota che nei giri più veloci, i piloti esperti mostrano un numero minore di saccadi, il che va ad indicare un alto livello di familiarità con il percorso, permettendo loro di ottimizzare la visione anticipatoria e ridurre la necessità di aggiustamenti visivi frequenti. Inoltre è emerso che i piloti esperti mostrano una maggiore stabilità nelle saccadi attraverso le curve, suggerendo una migliore capacità di anticipazione e controllo visivo in situazioni di guida complesse. Al contrario, i non esperti presentano un incremento della frequenza di saccadi in prossimità delle curve, indicativo di una minore sicurezza o abilità nel gestire le situazioni di guida più tecniche.

Un altro parametro indagato e oggetto di discussione è la dilatazione della pupilla. La misura della pupilla, riesce ad esprimere indici di attenzione, stress, interesse o emozione ed è correlato al carico di lavoro mentale e all'eccitazione. Studi hanno valutato che maggiore è la difficoltà del compito, maggiore è dilatazione della pupilla (Bergstrom & Schall, 2014). Poiché la dimensione della pupilla ha dimostrato di essere una misura affidabile correlata ai cambiamenti del carico di lavoro, i produttori di eye-tracking indossabili moderni hanno incorporato una misura diretta dello sforzo cognitivo dell'utente utilizzando l'Indice di attività cognitiva come misura del carico di lavoro basato sulle variazioni di dilatazione della pupilla (Marshall, 2002). Questo metodo permette ai ricercatori di osservare come varia il diametro della pupilla con la difficoltà del compito, fornendo una misura quantitativa del carico cognitivo (Krejtz et al., 2018). I risultati sulla dilatazione pupillare estrapolati per valutare le differenze tra piloti non hanno rivelato differenze statisticamente significative nel diametro della pupilla tra i due gruppi durante le sessioni di guida esaminate. Questo ha suggerito che, nonostante le differenze nelle competenze e nell'esperienza di guida, il carico cognitivo e lo stress visivo sperimentato dai piloti non ha differito in modo sostanziale.

Tale equiparazione è attribuita alla condivisione di sfide comuni sul circuito, come la necessità di monitorare costantemente l'ambiente circostante, adattarsi alle mutevoli condizioni di pista e prendere decisioni rapide durante la guida ad alta velocità.

La mancanza di divergenze significative nel diametro della pupilla sottolinea l'importanza di considerare ulteriori indicatori comprendere appieno le dinamiche della performance di guida. Anche se non emergono differenze nel diametro della pupilla, resta fondamentale valutare l'effetto del carico cognitivo e dello stress visivo dei piloti. Dall'analisi dei pattern visivi correlati alla dilatazione pupillare in un settore di pista tramite analisi cluster, spunti interessanti sono emersi sul comportamento fisiologico e cognitivo dei piloti di kart. Questo metodo ha permesso di raggruppare i piloti in base alle caratteristiche specifiche della risposta pupillare durante la guida, offrendo una visione approfondita di come vari livelli di esperienza possano influenzare le strategie visive e il carico cognitivo. L'analisi cluster condotta sui dati relativi al diametro della pupilla ha rivelato l'esistenza di tre gruppi distinti di piloti, ognuno caratterizzato da pattern di risposta pupillare diversi. Il primo gruppo, che comprende piloti con una risposta

pupillare mediamente costante, indica un alto livello di adattamento e di controllo cognitivo, permettendo ai piloti di mantenere una stabilità visiva nonostante le pressioni della guida ad alta velocità. Questo gruppo è prevalentemente costituito da piloti esperti, che hanno dimostrato di gestire efficacemente il carico cognitivo. Il secondo cluster include piloti con una variazione moderata del diametro pupillare, suggerendo una capacità intermedia di adattamento alle condizioni dinamiche del circuito. Questi piloti potrebbero beneficiare di ulteriori sessioni di allenamento focalizzate sulla gestione dello stress e sulla risposta visiva ottimale. Infine, il terzo gruppo, che mostra le variazioni più pronunciate della dilatazione pupillare, potrebbe indicare una minore stabilità nel controllo del carico cognitivo e una maggiore reattività agli stimoli visivi e ambientali. Questo pattern è tipico dei piloti meno esperti o di quelli che potrebbero avere difficoltà a mantenere un'efficacia visiva sotto pressione.

In letteratura viene indicato come le prestazioni cognitive si deteriorano con la fatica, influenzando la capacità di decisione, attenzione e percezione (Schiphof-Godart et al., 2018). Si è visto come la fatica mentale può alterare il pilota atleta, nella sua volontà e capacità di continuare a esercitarsi durante le varie prestazioni, portando a una fatica mentale aumentata e a uno sforzo percepito maggiore (Van Cutsem & Marcora 2021). Per questo motivo il terzo obiettivo della ricerca ha fornito un quadro dettagliato sull'impatto della fatica visiva durante sessioni di allenamento giornaliero prolungato di un pilota di Go-Kart, mettendo in luce come specifici parametri oculari variano in risposta a sessioni consecutive di guida. Anche in questo caso la correlazione tra la dilatazione pupillare media e i tempi medi per giro mostra una relazione negativa moderata, suggerendo che maggiore è l'attenzione o l'attivazione, minori sono i tempi per giro. Questo è coerente con la teoria che un maggiore impegno cognitivo può portare a prestazioni migliorate.

L'analisi sul pilota ha rivelato che la dilatazione pupillare media aumenta significativamente con il progredire delle sessioni di allenamento. Questo incremento, da una media di 2.995 mm nella prima sessione a 3.514 mm nella quarta sessione, suggerisce un aumento del carico cognitivo e della stanchezza visiva. Tale fenomeno indica un possibile aumento dell'attivazione psicofisiologica necessaria per mantenere alte prestazioni nonostante la crescente fatica questa ipotesi è in linea con gli studi che hanno

valutato il sovraccarico cognitivo evidenziando come la dilatazione sia proporzionale alla complessità del compito sostenendo che modifiche anche minori nel diametro della pupilla possono riflettere variazioni significative nell'attività cerebrale e nei processi cognitivi (Rodemer et al 2023). Parallelamente, il conteggio delle fissazioni mostra un incremento fino alla terza sessione, diminuendo leggermente nella quarta. Questo potrebbe riflettere una maggiore necessità iniziale del pilota di raccogliere informazioni visive per adattarsi al tracciato, seguita da una possibile aumento dell'attenzione visiva e impegno nel fare il tempo migliore.

Il forte legame negativo tra il conteggio delle fissazioni e i tempi giro indicano che una maggiore attività visiva è associata a tempi di giro più brevi, questo riflette una maggiore concentrazione e capacità di reazione durante la guida veloce. In contrasto, la debole correlazione tra i blink e i tempi di giro suggeriscono che i blink, in questo contesto, non influenzano significativamente la velocità di guida.

Mentre variazioni significative, con un picco nella seconda sessione, indicano un aumento della fatica visiva. Tuttavia, la relativa stabilità nella durata media dei blink suggerisce che il pilota è stato in grado di mantenere un certo livello di controllo nonostante l'affaticamento. L'analisi sulle unità di misura inerziale (IMU) hanno fornito ulteriori spunti interessanti riguardo alla relazione tra le variabili cinetiche del pilota e le sue prestazioni sul tracciato. I dati mostrano una forte correlazione tra le metriche di movimento del pilota e tempi medi per giro, evidenziando come i momenti angolari della testa possano influenzare significativamente le prestazioni, come ampiamente mostrato nei contesti sportivi dove la reazione del corpo alle accelerazioni e ai movimenti angolari ha un impatto significativo sulla performance atletica, soprattutto nella gestione delle accelerazioni per ottimizzare la performance e ridurre il rischio di infortuni, e un potenziamento muscolare contribuisce significativamente alla gestione del corpo, influenzando la stabilità e la capacità di eseguire movimenti rapidi e precisi (Alanen et al., 2021). Nel caso del pilota analizzato è stato evidenziato che ridurre il beccheggio della testa mentre guida il Kart potrebbe contribuire notevolmente a migliorare le prestazioni in pista, ed insieme a una stabilità delle forze laterali portando il pilota a migliori prestazioni in pista.

Contrariamente, la velocità di rotazione lungo l'asse Z ha evidenziato una correlazione positiva molto forte, Ciò implica che un aumento del rollio potrebbe essere cruciale per migliorare le prestazioni, insieme a una maggiore stabilità verticale e un impatto positivo sulle prestazioni.

La velocità e l'accelerazione lungo l'asse Y (Accelerazione Y) hanno mostrato correlazioni meno significative, indicando che l'imbardata ha un impatto minore sulle prestazioni rispetto al beccheggio e al rollio. Questi aspetti correlati con la performance enfatizzano l'importanza di monitorare e ottimizzare il movimento del pilota in relazione agli assi di beccheggio, rollio e, in misura minore, nell'imbardata. Uno studio sul controllo integrato dell'imbardata, del rollio e del beccheggio per garantire la sicurezza durante la frenata, conferma la teoria sui miglioramenti della stabilità ma sul veicolo riducendo il rischio di incidenti (Chen et al., 2023). Nessuno studio ha dimostrato come il corpo reagisce alle accelerazioni e ai movimenti angolari in termini di efficacia sulla performance nel kart sono pochi. Interessante sarebbe e correlare parametri oggetti con il carico cognitivo offrendo spunti per affinare le tecniche di guida e le strategie di allenamento.

Basandosi sui risultati dettagliati e sulle osservazioni fatte, possiamo concludere che la ricerca ha offerto importanti intuizioni sul ruolo dell'analisi visiva nel karting, con particolare attenzione al comportamento dei piloti in diverse condizioni di pista. Utilizzando l'eye tracker, lo studio ha potuto dimostrare come le strategie visive si adattano dinamicamente alle variazioni ambientali, migliorando così la comprensione delle capacità visive e cognitive dei piloti durante la guida.

Importanti sono le scoperte relative all'influenza delle condizioni della pista sull'attenzione e le strategie visive dei piloti, suggerendo che un ambiente di guida più impegnativo richieda un adattamento significativo delle capacità visive e cognitive. Inoltre, il confronto tra piloti esperti e non esperti ha evidenziato differenze sostanziali nel comportamento visivo, suggerendo che l'esperienza di guida contribuisca a un più efficiente processo decisionale visivo e a una migliore gestione del carico cognitivo.

Questi risultati non solo arricchiscono la letteratura scientifica riguardante l'oculometria e le dinamiche di guida sportiva, ma forniscono anche dati preziosi per lo sviluppo di programmi di formazione mirati a migliorare le prestazioni dei piloti, attraverso una

migliore comprensione e gestione delle loro risposte visive e cognitive in pista. La ricerca ha quindi il potenziale di influenzare positivamente le pratiche di sicurezza e le tecniche di allenamento nel karting, promuovendo un approccio più informato e scientificamente validato alla preparazione dei piloti.

## **CONCLUSIONI**

Il presente studio rappresenta un'importante indagine esplorativa volta alla valutazione dei parametri oculari, quali fissazioni, blink, saccadi e diametro della pupilla, nella pratica sportiva del Karting. Gli obiettivi di ricerca ipotizzati hanno guidato l'analisi dettagliata di tali parametri, fornendo una panoramica significativa sul ruolo dell'attenzione visiva e della percezione visiva durante l'attività di allenamento di piloti agonisti.

L'analisi delle fissazioni e dei blink durante le sessioni di allenamento ha consentito di comprendere l'interazione tra l'attenzione visiva e le prestazioni dei piloti di go-kart, mentre l'analisi dei saccadi ha fornito informazioni preziose sui pattern di movimento oculare e sull'efficienza visiva durante la guida. La misurazione del diametro della pupilla ha ulteriormente arricchito la nostra comprensione della reattività pupillare agli stimoli visivi e delle sue implicazioni sulla percezione visiva durante la conduzione del kart.

La metodologia utilizzata, ha consentito di garantire l'attendibilità e la validità dei dati raccolti e i risultati ottenuti sono stati oggetto di discussione nel testo, evidenziando le relazioni estremamente significative rivelando un approccio innovativo nell'analisi visiva nel contesto del karting. L'utilizzo dell'eye tracker Eye Pupil Neon ha permesso di ottenere un'approfondita comprensione dell'analisi visiva del pilota di go-kart durante le sessioni di allenamento, sia in condizioni normali che avverse di pista. I risultati confermano l'efficacia scientifica di questo strumento nel fornire indicazioni cruciali per l'analisi visiva, evidenziando l'utilità dei parametri derivati dal dataset ricavato.

In particolare, l'analisi ha rivelato come le condizioni della pista, sia asciutta che bagnata, influenzino significativamente il comportamento visivo dei piloti. In condizioni bagnate, con la tendenza a modificare le proprie strategie visive, alzando lo sguardo più frequentemente per anticipare ostacoli e adattare la loro guida alla minore aderenza della pista. Questi adattamenti sono cruciali per massimizzare la sicurezza e la reattività dei piloti in risposta a condizioni più sfidanti.

Inoltre, l'analisi ha evidenziato differenze significative nel comportamento visivo tra piloti esperti e non esperti. I piloti esperti mostrano una maggiore efficienza nel processamento visivo, caratterizzata da fissazioni più lunghe ma meno frequenti rispetto ai novizi. Questo indica una maggiore capacità di mantenere la concentrazione e minimizzare le distrazioni, ottimizzando l'elaborazione delle informazioni cruciali durante la guida.

Un aspetto importante emerso dalla ricerca è l'effetto della fatica visiva sulle prestazioni dei piloti durante le sessioni di allenamento prolungate. L'incremento della dilatazione pupillare e del conteggio delle fissazioni nel corso delle sessioni suggerisce un aumento del carico cognitivo e della stanchezza visiva, che potrebbe influenzare le prestazioni dei piloti.

Infine, l'analisi delle unità di misura inerziale ha evidenziato l'importanza del movimento del pilota, in particolare del beccheggio e del rollio, sulla performance in pista. Ridurre il beccheggio della testa durante la guida può contribuire significativamente a migliorare le prestazioni, mentre un aumento del rollio potrebbe essere cruciale per ottimizzare la performance. La ricerca fornisce importanti intuizioni sul ruolo dell'analisi visiva nel karting e offre dati preziosi per lo sviluppo di programmi di formazione mirati a migliorare le prestazioni dei piloti. Questo studio ha il potenziale per influenzare positivamente le pratiche di sicurezza e le tecniche di allenamento nel karting, promuovendo un approccio più informato e scientificamente validato alla preparazione dei piloti.

## **IMPLICAZIONI FUTURE**

La ricerca presentata, è stata dedicata all'analisi dell'impatto degli aspetti visivi sulle prestazioni dei piloti di go-kart, evidenziando come le variabili ambientali e la fatica incidano significativamente sul comportamento visivo dei piloti. Al fine di mitigare tali effetti negativi e amplificare le loro capacità di adattamento, si ipotizza l'implementazione di algoritmi di machine learning, al fine di rivoluzionare l'approccio all'addestramento nel settore del karting, utilizzando come dati di input le variabili oculari esaminate, quali fissazioni, saccadi, blink e diametro della pupilla.

Tali modelli potrebbero essere supportati dai dati raccolti tramite l'utilizzo dell'eye tracker Pupil NEON, consentendo di ottenere in tempo reale risposte individualizzate relative alle prestazioni visive durante le sessioni di allenamento. Questo approccio mirerebbe a ottimizzare il carico visivo e cognitivo, personalizzandolo in base alla risposta individuale del pilota e facilitando il trasferimento di informazioni visive efficaci anche ai piloti meno esperti.

In futuro, l'espansione delle implicazioni di queste tecnologie dovrebbe essere estesa anche ad altri contesti sportivi, in cui si potrebbe migliorare non solo la sicurezza, ma anche le performance degli atleti. Attualmente, sistemi di rilevamento della distrazione cognitiva del conducente su strada, supportati da sistemi automatici di apprendimento, sono in fase avanzata di sviluppo e progettazione. L'integrazione efficace di tali tecnologie nel mondo del karting potrebbe dunque non solo migliorare la sicurezza, ma anche contribuire in modo significativo alle prestazioni sportive in pista.

Inoltre, i risultati ottenuti sottolineano l'importanza di personalizzare gli allenamenti in base alle caratteristiche individuali dei piloti. Questo approccio potrebbe ottimizzare i risultati, riducendo i bias visivi e cognitivi. L'impiego di training di neurofeedback e biofeedback potrebbe dimostrarsi determinante nel migliorare la risposta cognitiva durante l'addestramento. Ulteriormente, l'introduzione di metodi alternativi di allenamento, come l'utilizzo di occhiali stroboscopici, potrebbe produrre effetti positivi sulla capacità di focalizzazione e reattività visiva, aumentando la frequenza dei blink e altri parametri correlati alla fatica e alla concentrazione.

## **LIMITI DELLO STUDIO**

Nonostante i risultati promettenti, il presente studio presenta alcune limitazioni significative che meritano attenzione. Una delle principali restrizioni è la dimensione limitata del campione: il numero ristretto di piloti coinvolti, sia esperti che non, riduce la generalizzabilità e la robustezza dei risultati ottenuti. Un campione più ampio avrebbe potuto fornire indicazioni più affidabili e universali.

Inoltre, le condizioni della pista durante la raccolta dei dati non sono state sufficientemente controllate, introducendo variabilità nei risultati. Fattori come le

condizioni meteorologiche, la temperatura, la qualità della superficie della pista e il numero di piloti presenti al momento del test potrebbero aver influenzato le prestazioni. Un altro punto critico riguarda l'accuratezza della tecnologia di tracciamento oculare utilizzata, che potrebbe aver introdotto delle imprecisioni. La presenza di occhiali, riflessi indesiderati e altre interferenze potrebbero aver compromesso la precisione delle misurazioni.

Le differenze individuali tra i piloti, quali livelli di stanchezza, motivazione e capacità visiva naturale, non sono state adeguatamente controllate, introducendo ulteriori variabili non quantificabili che potrebbero aver influenzato i comportamenti osservati.

In aggiunta, lo studio si è limitato all'analisi di parametri visivi, trascurando altri importanti fattori fisiologici e psicologici che potrebbero influenzare le prestazioni dei piloti, come la frequenza cardiaca o i livelli di stress.

La durata limitata dello studio e il numero ridotto di sessioni di guida non sono stati sufficienti per catturare tutte le variabili che influenzano il comportamento visivo dei piloti. Studi longitudinali potrebbero offrire una comprensione più approfondita delle dinamiche a lungo termine delle abilità visive.

Queste limitazioni sottolineano la necessità di ulteriori ricerche per confermare e ampliare i risultati ottenuti. Future indagini dovrebbero includere campioni più ampi, condizioni di test più controllate e l'integrazione di ulteriori parametri fisiologici e psicologici, per una comprensione più completa dei fattori che influenzano le prestazioni dei piloti.

## **LISTA DELLE TABELLE**

Tabella 1 revisione articoli Pupil labs

### **Obiettivo 1**

Tabella 2 variabilità dello sguardo durante la guida del kart su asciutto e bagnato

(Tabella 3) significatività dei valori IMU per le condizioni asciutto bagnato

(Tabella 4) medie delle coordinate x e y dello sguardo nelle due condizioni

(Tabella 5) durata media delle fissazioni nelle due condizioni asciutte e bagnate

(Tabella 6) valori di ampiezza media delle saccadi asciutto/bagnato

(tabella 7) medie numero e durata degli ammiccamenti asciutto/bagnato

(Tabella 8) significatività differenze frequenza dei Blinks asciutto bagnato

## **Obiettivo 2**

(Tabella 9) Caratteristiche del campione in base all'esperienza

(Tabella 10) media numero e durata delle fissazioni Totale /esperti /non esperti

(Tabella 11) ANOVA differenze statistiche sul numero e durata delle fissazioni per giro

(Tabella 12) significatività nei Giri sul numero e durata delle fissazioni

(Tabella13) significatività sui giri tra esperti e non esperti sul numero delle saccadi

(tabella 14) correlazione tra velocità numero di saccadi, piloti esperti e non esperti

(tabella 15) dati regressione lineare tra esperti e non esperti (durata saccadi / tempo giro)

(tabella 16) regressione lineare tra esperti e non esperti (numero saccadi / tempo giro)

(Tabella 17) Numero e Durata Media degli Ammiccamenti tra Piloti Esperti e Non Esperti

(tabella 18) medie numero e durata blinks esperti/non esperti

(Tabella 19) risultati regressione lineare (durata media Blink/velocità) per giri

(tabella 20) regressione lineare tra esperti e non esperti (numero Blinks / Velocità)

(Tabella 21) medie dilatazione pupillare per Giro esperti Non Esperti

(Tabella 22) di correlazione blinks/settore tra i giri

(Tabella 23) descrittive fissazioni esperti non esperti settore pista

(Tabella 24) significatività differenze medie sul numero e durata delle fissazioni

(Tabella 25) significatività sulle differenze medie sul numero e durata delle fissazioni per giro

(Tabella 26) tabella di correlazione fissazioni tempo settore

(Tabella 27) descrittive analisi Cluster

(Tabella 28) Significatività differenze medie esperti / non esperti per gli assi X;Y;Z

(Tabella 29) correlazioni con il tempo medio impiegato a completare il settore tra esperti/non esperti

(Tabella 30) Statistiche descrittive sul numero delle fissazioni ingresso/uscita tra gruppi di piloti

(tabella 31) analisi di regressione lineare (durata fissazioni uscita curva 1/Velocità sul giro)

(tabella 32) analisi di regressione lineare (durata fissazioni uscita curva 1/tempo sul giro)

(tabella 33) statistiche descrittive medie Blinks in Curva 1 esperti e non esperti

(tabella 34) Numero medio dei blinks in ingresso curva su velocità giro tra esperti non esperti

(tabella 35) Numero medio blinks in ingresso curva su velocità giro tra esperti e non esperti

(tabella 36) Numero medio blinks ingresso curva su tempo giro tra esperti e non esperti

(tabella 37) Numero medio blinks uscita curva su tempo giro tra esperti e non esperti

- (tabella 38) Durata media blinks ingresso curva su velocità giro tra esperti non esperti
- (tabella 39) Durata media blinks ingresso curva su tempo giro tra esperti non esperti
- (tabella 40) Durata media blinks uscita curva su velocità giro tra esperti e non esperti
- (tabella 41) Durata media blinks uscita curva su tempo giro tra esperti e non esperti
- (tabella 42) statistiche descrittive differenze diametro della pupilla ingresso/uscita della curva 1 per ciascun giro
- (tabella 43) Differenze tra i piloti esperti e non esperti, sia per il numero che per durata delle saccadi all'ingresso e all'uscita della curva 1
- (tabella 44) Differenze piloti esperti / non esperti, sia per il numero che per durata delle saccadi all'ingresso e all'uscita della curva 1
- (tabella 45) Statistiche descrittive numero e durata fissazioni ingresso curva 9
- (tabella 46) significatività Numero e durata fissazioni ingresso curva 9
- (tabella 47) significatività Numero e durata fissazioni uscita curva 9
- (Tabella 48) statistiche descrittive sul numero e durata media delle saccadi curva 9
- (Tabella 49) significatività statistica sul numero e durata delle saccadi di curva 9 per giro
- (tabella 50) Statistiche descrittive curva 9 esperti e non esperti blinks curva 9
- (Tabella 51) significatività Diametro della Pupilla tra esperti e non esperti curva 09
- (Tabella 52) I risultati diametro pupilla per i piloti non esperti e esperti curva 9
- (Tabella 53) regressione lineare (dilatazione pupillare/velocità)
- (Tabella 54) regressione lineare (dilatazione pupillare/tempo sul giro)

### **Obiettivo 3**

- (Tabella 55) medie totali tra sessioni di allenamento pilota singolo
- (tabella 56) tempo medio giri delle 4 sessioni
- (tabella 57) correlazioni tra parametri oculari e tempi medi delle sessioni di allenamento
- (tabella 58) correlazioni dati IMU con i tempi medi giro per sedute



## BIBLIOGRAFIA

- Abbott, W. W., & Faisal, A. A. (2012). Ultra-low-cost 3D gaze estimation: an intuitive high information throughput compliment to direct brain-machine interfaces. *Journal of neural engineering*, 9(4), 046016.
- Alanen, A. M., Räisänen, A. M., Benson, L. C., & Pasanen, K. (2021). The use of inertial measurement units for analyzing change of direction movement in sports: A scoping review. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(6), 1332-1353.
- Aluja, A., Balada, F., García, O., & García, L. F. (2023). Psychological predictors of risky driving: the role of age, gender, personality traits (Zuckerman's and Gray's models), and decision-making styles. *Frontiers in psychology*, 14, 1058927.
- Andersson, R., Nyström, M., & Holmqvist, K. (2010). Sampling frequency and eye-tracking measures: how speed affects durations, latencies, and more. *Journal of Eye Movement Research*, 3(3)
- Appelbaum, L. G., & Erickson, G. (2018). Sports vision training: A review of the state-of-the-art in digital training techniques. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 11(1), 160-189.
- Arba-Mosquera, S., & Aslanides, I. M. (2012). Analysis of the effects of Eye-Tracker performance on the pulse positioning errors during refractive surgery. *Journal of Optometry*, 5(1), 31-37.
- Arend Jr, L. E., & Skavenski, A. A. (1979). Free scanning of gratings produces patterned retinal exposure. *Vision Research*, 19(12), 1413-1419.
- Aserinsky, E., & Kleitman, N. (1953). Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science*, 118(3062), 273-274.

## REFERENCES

- Backman, J., Häkkinen, K., Ylinen, J., Häkkinen, A., & Kyröläinen, H. (2005). Neuromuscular performance characteristics of open-wheel and rally drivers. *J Strength Cond Res.*, 19: 777±84.
- Bafna, T., & Hansen, J. P. (2021). Mental fatigue measurement using eye metrics: A systematic literature review. *Psychophysiology*, 58(6), e13828.
- Bagot, P., Fournier, J. F., Kerivel, T., Bossard, C., Kermarrec, G., Martinent, G., & Bernier, M. (2023). Visual Search Strategies of Elite Fencers: An Exploratory Study in Ecological Competitive Situation. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 8(3), 106.
- Baldisserri, L., Bonetti, R., Pon, F., et al. (2014). Motorsport driver workload estimation in dual task scenario: a methodology for assessing driver workload in a racing simulator. *6th International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications. IARIA*, pp.56-61.
- Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Pelz, J. B. (1995). Memory representations in natural tasks. *Journal of cognitive neuroscience*, 7(1), 66-80.
- Barlow, H. B. (1952). Eye movements during fixation. *The Journal of Physiology*, 116(3), 290.
- Basso, J. C., & Suzuki, W. A. (2017). The effects of acute exercise on mood, cognition, neurophysiology, and neurochemical pathways: a review. *Brain Plasticity*, 2(2), 127-152.
- Baur, H., Müller, S., Hirschmüller, A., Huber, G., & Mayer, F. (2006). Reactivity, stability, and strength performance capacity in motor sports. *British Journal of Sports Medicine*, 40(11), 906–910.
- Beatty, J., & Kahneman, D. (1966). Pupillary changes in two memory tasks. *Psychonomic Science*, 5(10), 371-372.
- Beatty, J., Lucero-Wagoner, B., Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. (2000). Handbook of psychophysiology. *The pupillary system.*, 142-162.
- Beaune, B., & Durand, S. (2011). Cardiac chronotropic adaptation to open-wheel racecar driving in young pilots. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 11(2), 325-334.

## REFERENCES

- Beaune, B., Durand, S., & Mariot, J. P. (2010). Open-wheel race car driving: energy cost for pilots. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 2927-2932.
- Bedell, H. E., & Stevenson, S. B. (2013). Eye movement testing in clinical examination. *Vision Research*, 90, 32-37.
- Bedggood, P., & Metha, A. (2017). De-warping of images and improved eye tracking for the scanning laser ophthalmoscope. *PloS one*, 12(4), e0174617.
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 14(3), 199-208.
- Bengi, H., & Thomas, J. G. (1968). Three electronic methods for recording ocular tremor. *Medical and Biological Engineering*, 6(2), 171–179.
- Bernardi, G., Cecchetti, L., Handjaras, G., Sani, L., Gaglianese, A., Ceccarelli, R., ... & Pietrini, P. (2014). It's not all in your car: functional and structural correlates of exceptional driving skills in professional racers. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 888.
- Bertrand, C., Keromes, A., Lemeunier, B. F., Meistelmann, C., Prieur, C., & Richalet, J. P. (1983). Physiologie des sports Mécaniques. *In 1st international congress of sport automobile, Marseilles*.
- Binda, P., & Murray, S. O. (2015). Keeping a large-pupilled eye on high-level visual processing. *Trends in cognitive sciences*, 19(1), 1-3.
- Birrer, D., & Morgan, G. (2010). Psychological skills training as a way to enhance an athlete's performance in high-intensity sports. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 20, 78-87.
- Boening, G., Bartl, K., Dera, T., Bardins, S., Schneider, E., & Brandt, T. (2006, March). Mobile eye tracking as a basis for real-time control of a gaze driven head-mounted video camera. *In Proceedings of the 2006 symposium on Eye tracking research & applications* (pp. 56-56).
- Boksem, M. A., & Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits. *Brain research reviews*, 59(1), 125-139.
- Bonnet, C., Hanuška, J., Rusz, J., Rivaud-Péchoux, S., Sieger, T., Majerová, V., ... & Růžicka, E. (2013). Horizontal and vertical eye movement metrics: what is important? *Clinical Neurophysiology*, 124(11), 2216-2229.

## REFERENCES

- Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.
- Bour, L. J., Van Gisbergen, J. A., Bruijns, J., & Ottes, F. P. (1984). The double magnetic induction method for measuring eye movement-results in monkey and man. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, (5), 419-427.
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602-607.
- Breen, M., Reed, T., Nishitani, Y., Jones, M., Breen, H. M., & Breen, M. S. (2023). Wearable and Non-Invasive Sensors for Rock Climbing Applications: Science-Based Training and Performance Optimization. *Sensors*, 23(11), 5080.
- Breivik, G. (2013). Zombie-like or superconscious? A phenomenological and conceptual analysis of consciousness in elite sport. *Journal of the Philosophy of Sport*, 40(1), 85-106.
- Breslow, L. A., Gartenberg, D., McCurry, J. M., & Trafton, J. G. (2014). Dynamic operator overload: A model for predicting workload during supervisory control. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(1), 30-40.
- Bridgeman, B. (1992). Conscious vs unconscious processes: The case of vision. *Theory & Psychology*, 2(1), 73-88.
- Brouwer, A. M., Franz, V. H., & Gegenfurtner, K. R. (2009). Differences in fixations between grasping and viewing objects. *Journal of Vision*, 9(1), 18-18.
- Brown, M., Marmor, M., Vaegan, Zrenner, E., Brigell, M., & Bach, M. (2006). ISCEV standard for clinical electro-oculography (EOG) 2006. *Documenta Ophthalmologica*, 113(3), 205–212.
- Bueno A, Sato J, Hornberger M (2019) Eye tracking—the overlooked method to measure cognition in neurodegeneration? *Neuropsychologia* 133:107191.
- Buswell, G. T. (1935). How people look at pictures: *a study of the psychology and perception in art*.

## REFERENCES

- Cao, M. Y., Mao, X., & Huang, L. (2020). Elevation, azimuth, and polarization estimation with nested electromagnetic vector-sensor arrays via tensor modeling. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 1-23.
- Cardona Suárez, C. A., & Gutiérrez Valderrama, J. (2020). The law of refraction and Kepler's heuristics. *Archive for History of Exact Sciences*, 74(1), 45-75.
- Carpenter, R. H., & Williams, M. L. L. (1995). Neural computation of log likelihood in control of saccadic eye movements. *Nature*, 377(6544), 59-62.
- Carter, B. T., & Luke, S. G. (2020). Best practices in eye tracking research. *International Journal of Psychophysiology*, 155, 49-62.
- Causer, J.-P., DeLucia, D. J., & Schutz, Y. (2003). The role of visual anticipation in skilled driving. *Human Factors*, 45(3), 392-405.
- Cavero, I., Guillon, J. M., & Holzgrefe, H. H. (2017). Reminiscing about Jan Evangelista Purkinje: a pioneer of modern experimental physiology. *Advances in Physiology Education*, 41(4), 528-538.
- Chan, M. K., Wong, C. L., Yu, K. P., & Tong, R. K. (2023). Examining Eye Tracking Metrics and Cognitive Function in Post-Stroke Individuals: A Comparison of Visual Searching Tasks Between Those with and without Cognitive Impairment. *Cerebrovascular Diseases (Basel, Switzerland)*.
- Chandon, P., Hutchinson, J., Bradlow, E., & Young, S. H. (2006). Measuring the value of point-of-purchase marketing with commercial eye-tracking data. *INSEAD Business School Research Paper*, (2007/22).
- Charbonneau, E., Begon, M., & Romeas, T. (2023). A temporal quantitative analysis of visuomotor behavior during different twisting somersaults in elite and sub-elite trampolinists.
- Chen, J. T., Kuo, Y. C., Hsu, T. Y., & Wang, C. A. (2022). Fatigue and arousal modulations revealed by saccade and pupil dynamics. *International journal of environmental research and public health*, 19(15), 9234.
- Chen, J., Liu, Y., Liu, R., Xiao, F., & Huang, J. (2023). Integrated control of braking-yaw-roll stability under steering-braking conditions. *Scientific reports*, 13(1), 21110.
- Cherng, Y. G., Baird, T., Chen, J. T., & Wang, C. A. (2020). Background luminance effects on pupil size associated with emotion and saccade preparation. *Scientific reports*, 10(1), 15718.

## REFERENCES

- Chopra-Khullar, S. (1999). Where to look? Automating certain visual attending behaviors of human characters. *University of Pennsylvania*.
- Chopra-Khullar, S., & Badler, N. I. (2001). Where to look? Automating certain visual attending behaviors of human characters. *Auton Agent Syst*, 4: 9-23.
- Clay, V., König, P., & Koenig, S. (2019). Eye tracking in virtual reality. *Journal of eye movement research*, 12(1).
- Cognolato, M., Atzori, M., & Müller, H. (2018). Head-mounted eye gaze tracking devices: An overview of modern devices and recent advances. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 5, 2055668318773991.
- Collewijn, H. (1998). *Eye movement recording*. chapter 9.
- Collewijn, H., Van der Mark, F., & Jansen, T. C. (1975). Precise recording of human eye movements. *Vision research*.
- Collewijn, H., Van der Steen, J., Ferman, L., & Jansen, T. C. (1985). Human ocular counterroll: assessment of static and dynamic properties from electromagnetic scleral coil recordings. *Experimental Brain Research*, 59, 185-196.
- Cornsweet, T. N. (1958). New technique for the measurement of small eye movements. *Journal of the Optical Society*.
- Crane, H. D., & Steele, C. M. (1985). Generation-V dual-Purkinje-image eyetracker. *Applied optics*, 24(4), 527-537.
- Crevecoeur, F., & Kording, K. P. (2017). Saccadic suppression as a perceptual consequence of efficient sensorimotor estimation. *Elife*, 6, e25073.
- Crundall, D. E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41(4), 448-458.
- Crundall, D., Shenton, C., & Underwood, G. (2004). Eye movements during intentional car following. *Perception*, 33(8), 975-986.
- Crundall, D., Underwood, G., & Chapman, P. (2002). Attending to the peripheral world while driving. *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 16(4), 459-475.

## REFERENCES

- Das, P. (2010). Design And Fabrication Of A Go-Kart Vehicle With Improved Suspension And Dynamics. *Bits Pilani KK Birla, Goa Campus*.
- Daxecker, F. (1993). Christoph Scheiner's eye studies. *History of Ophthalmology 5: Sub auspiciis Academiae Ophthalmologicae Internationalis*, 27-35.
- De Quel, Ó. M., & Bennett, S. J. (2019). Perceptual-cognitive expertise in combat sports: a narrative review and a model of perception-action. [Habilidades perceptivo-cognitivas en deportes de combate: una revisión narrativa y un modelo de percepción-acción]. RICYDE. *Revista Internacional de Ciencias del Deporte*.
- De Wachter, J., Proost, M., Habay, J., Verstraelen, M., Diaz-Garcia, J., Hurst, P., ... & Roelands, B. (2021). Prefrontal cortex oxygenation during endurance performance: a systematic review of functional near-infrared spectroscopy studies. *Frontiers in Physiology*, 12, 761232.
- Deubel, H., & Bridgeman, B. (1995). Fourth Purkinje image signals reveal eye-lens deviations and retinal image distortions during saccades. *Vision research*, 35(4), 529-538.
- Di Stasi, L. L., Catena, A., Cañas, J. J., Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2013). Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(5), 968-975.
- Di Stasi, L. L., Renner, R., Catena, A., Canas, J. J., Velichkovsky, B. M., & Pannasch, S. (2012). Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data. *Transportation research part C: emerging technologies*, 21(1), 122-133.
- Díaz-García, J., González-Ponce, I., López-Gajardo, M. Á., Van Cutsem, J., Roelands, B., & García-Calvo, T. (2021). How mentally fatiguing are consecutive world padel tour matches? *International journal of environmental research and public health*, 18(17), 9059.
- Diaz-Tula, A., & Morimoto, C. H. (2017). Robust, real-time eye movement classification for gaze interaction using finite state machines. *In 2017 COGAIN symposium*.
- Diefendorf, A. R., & Dodge, R. (1908). An experimental study of the ocular reactions of the insane from photographic records. *Brain*, 31(3), 451-489.
- Distler C et al (2011) *The optokinetic reflex*, vol 1. Oxford University Press

## REFERENCES

- Distler, C., & Hoffmann, K. P. (2011). The optokinetic reflex. *The Oxford handbook of eye movements*, 65-83.
- Dodge, R. (1899). The reaction time of the eye. *Psychological Review*, 6(5), 477.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movement. *Psychological Review*, 7(5), 454.
- Dodge, R., & Cline, T. S. (1901). The angle velocity of eye movements. *Psychological Review*, 8(2), 145.
- Douglas, D. H., & Peucker, T. K. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization*, 10(2), 112-122.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311-312.
- Droege, D., & Paulus, D. (2010, March). Pupil center detection in low resolution images. *In Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications* (pp. 169-172).
- Duchowski, A. T. (2007). "Eye Tracking Methodology: Theory and Practice". *Behaviour & Information Technology*, 26(4), 333-343.
- Duchowski, A. T., Driver, J., Jolaoso, S., Tan, W., Ramey, B. N., & Robbins, A. (2010, March). Scanpath comparison revisited. *In Proceedings of the 2010 symposium on eye-tracking research & applications* (pp. 219-226).
- Duchowski, T. A. (2017). Eye tracking: methodology theory and practice. *Springer International Publishing AG*.
- Dunn, M. J., Alexander, R. G., Amiebenomo, O. M., Arblaster, G., Atan, D., Erichsen, J. T., ... & Sprenger, A. (2023). Minimal reporting guideline for research involving eye tracking (2023 edition). *Behavior research methods*, 1-7.
- Duwaer, A. L., Van Den Brink, G., Van Antwerpen, G., & Keemink, C. J. (1982). Comparison of subjective and objective measurements of ocular alignment in the vertical direction. *Vision Research*, 22(8), 983-989.

## REFERENCES

- Ebben, W. P., & Suchomel, T. J. (2012). Physical demands, injuries, and conditioning practices of stock car drivers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(5), 1188-1198.
- Ebitz, R. B., & Moore, T. (2017). Selective modulation of the pupil light reflex by microstimulation of prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 37(19), 5008-5018.
- Edmonds, W. A., Tenenbaum, G., Mann, D. T., Johnson, M., & Kamata, A. (2008). The effect of biofeedback training on affective regulation and simulated car-racing performance: A multiple case study analysis. *Journal of Sports Sciences*, 26(7), 761-773.
- Ehsani, J. P., Gershon, P., Grant, B. J., Zhu, C., Klauer, S. G., Dingus, T. A., & Simons-Morton, B. G. (2020). Learner driver experience and teenagers' crash risk during the first year of independent driving. *JAMA pediatrics*, 174(6), 573-580.
- Eibenberger, K., Eibenberger, B., & Rucci, M. (2016, August). Design, simulation and evaluation of uniform magnetic field systems for head-free eye movement recordings with scleral search coils. In *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 247-250). IEEE.
- Einhäuser, W. (2017). The pupil as marker of cognitive processes. *Computational and cognitive neuroscience of vision*, 141-169.
- Einhäuser, W., Schumann, F., Bardins, S., Bartl, K., Böning, G., Schneider, E., & König, P. (2007). Human eye-head co-ordination in natural exploration. *Network: Computation in Neural Systems*, 18(3), 267-297.
- Eker HH, Van Lieshout EMM, Den Hartog D, Schipper IB. Trauma mechanisms and injuries associated with go-karting. *Open Orthopaedic J* 4: 107–110, 2010.
- Ellis, C. J. (1981). The pupillary light reflex in normal subjects. *British Journal of Ophthalmology*, 65(11), 754-759.
- Erdmann, B., & Dodge, R. (1898). Psychologische Untersuchungen über das Lesen auf experimenteller Grundlage. *Niemeyer*.
- Estrany, B., & Fuster-Parra, P. (2022, September). Human Eye Tracking Through Electro-Oculography (EOG): A Review. In *International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering* (pp. 75-85). Cham: *Springer International Publishing*.

## REFERENCES

- Farnsworth, B. (2020). Top 12 Eye Tracking Hardware Companies (Ranked). Imotions. Available online at: <https://imotions.com/blog/top-eye-tracking-hardware-companies>.
- Filho, E., Di Fronso, S., Mazzoni, C., Robazza, C., Bortoli, L., & Bertollo, M. (2015). My heart is racing! Psychophysiological dynamics of skilled racecar drivers. *Journal of sports sciences*, 33(9), 945-959.
- Fink, L., Simola, J., Tavano, A., Lange, E., Wallot, S., & Laeng, B. (2023). From pre-processing to advanced dynamic modeling of pupil data. *Behavior Research Methods*, 1-37.
- Foulsham, T. (2015). Eye movements and their functions in everyday tasks. *Eye*, 29(2), 196-199.
- Frazier, L., & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive psychology*, 14(2), 178-210.
- Frens, M. A., & Van der Geest, J. N. (2002). Scleral search coils influence saccade dynamics. *Journal of neurophysiology*, 88(2), 692-698.
- Fuhl, W., Tonsen, M., Bulling, A., & Kasneci, E. (2016). Pupil detection for head-mounted eye tracking in the wild: an evaluation of the state of the art. *Machine Vision and Applications*, 27, 1275-1288.
- Fuhl, W., Weber, D., & Eivazi, S. (2022). Pistol: Pupil invisible supportive tool to extract pupil, iris, eye opening, eye movements, pupil and iris gaze vector, and 2d as well as 3d gaze. *arXiv preprint arXiv:2201.06799*.
- Fuller, B. (1980). Objective and subjective optometers—their operation and likely impact on optometry. *Clinical and Experimental Optometry*, 63(3), 110-118.
- Gal, O., & Chen-Morris, R. (2010). Baroque optics and the disappearance of the observer: From Kepler's optics to descartes' doubt. *Journal of the History of Ideas*, 71(2), 191-217.
- Galley, N. (1993). The evaluation of the electrooculogram as a psychophysiological measuring instrument in the driver study of driver behaviour. *Ergonomics*, 36(9), 1063-1070.
- Garai, L., & Horvath, A. (2020, September). Colour afterimages: computing and measuring virtual colour perception provided by two display types. *In 2020 11th*

## REFERENCES

- IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* (pp. 000109-000114). IEEE.
- García-Baos, A., Tomas, D., Oliveira, I., Collins, P., Echevarria, C., Zapata, L. P., ... & Super, H. (2019). Novel interactive eye-tracking game for training attention in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *The primary care companion for CNS disorders*, 21(4), 26348.
  - Gegenfurtner, A., Lehtinen, E., & Säljö, R. (2011). Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. *Educational psychology review*, 23, 523-552.
  - Gehring, W. J. (2014). The evolution of vision. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 3(1), 1-40.
  - Ghose, U., Srinivasan, A. A., Boyce, W. P., Xu, H., & Chng, E. S. (2020). PyTrack: An end-to-end analysis toolkit for eye tracking. *Behavior research methods*, 52, 2588-2603.
  - Gibaldi, A., & Sabatini, S. P. (2021). The saccade main sequence revised: A fast and repeatable tool for oculomotor analysis. *Behavior Research Methods*, 53, 167-187.
  - Gibaldi, A., Vanegas, M., Bex, P. J., & Maiello, G. (2017). Evaluation of the Tobii EyeX Eye tracking controller and Matlab toolkit for research. *Behavior research methods*, 49, 923-946.
  - Goebel, J. A., Tungsiripat, N., Sinks, B., Carmody, J., Goebel, J. A., Tungsiripat, N., et al. (2007). Gaze stabilization test: a new clinical test of unilateral vestibular dysfunction. *Otology & Neurotology*, 28(1), 68-73.
  - Goettker, A., & Gegenfurtner, K. R. (2021). A change in perspective: The interaction of saccadic and pursuit eye movements in oculomotor control and perception. *Vision Research*, 188, 283-296.
  - Goettker, A., Agtzidis, I., Braun, D. I., Dorr, M., & Gegenfurtner, K. R. (2020). From Gaussian blobs to naturalistic videos: Comparison of oculomotor behavior across different stimulus complexities. *Journal of vision*, 20(8), 26-26.
  - Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International journal of industrial ergonomics*, 24(6), 631-645.

## REFERENCES

- Goldberg, J. H., Stimson, M. J., Lewenstein, M., Scott, N., & Wichansky, A. M. (2002, March). Eye tracking in web search tasks: design implications. *In Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications* (pp. 51-58).
- Gray, R. (2008). Multisensory information in the control of complex motor actions. *Current Directions in Psychological Science*, 17(4), 244-248.
- Guestrin, E. D., & Eizenman, M. (2006). General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 53(6), 1124-1133.
- Guidetti, G., Guidetti, R., Manfredi, M., Manfredi, M., Lucchetta, A., & Livio, S. (2019). Saccades and driving. *Acta otorhinolaryngologica Italica: organo ufficiale della Societa italiana di otorinolaringologia e chirurgia cervico-facciale*, 39(3), 186–196. doi: 10.14639/0392-100X-2176.
- Guidetti, G., Guidetti, R., Manfredi, M., Manfredi, M., Lucchetta, A., & Livio, S. (2019). Saccades and driving. *Acta Otorhinolaryngologica Italica*, 39(3), 186.
- Guo, Y., Pannasch, S., Helmert, J. R., & Kaszowska, A. (2024). Ambient and focal attention during complex problem-solving: preliminary evidence from real-world eye movement data. *Frontiers in Psychology*, 15, 1217106.
- Haar, S., & Faisal, A. A. (2020). Neural biomarkers of multiple motor-learning mechanisms in a real-world task. *BioRxiv*, 2020-03.
- Haar, S., Sundar, G., & Faisal, A. A. (2021). Embodied virtual reality for the study of real-world motor learning. *Plos one*, 16(1), e0245717.
- Habay, J., Van Cutsem, J., Verschueren, J., De Bock, S., Proost, M., De Wachter, J., ... & Roelands, B. (2021). Mental fatigue and sport-specific psychomotor performance: a systematic review. *Sports Medicine*, 51, 1527-1548.
- Hallett, P. E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision research*, 18(10), 1279-1296.
- Hareźlak, K., Kasprowski, P., & Stasch, M. (2014). Towards accurate eye tracker calibration—methods and procedures. *Procedia Computer Science*, 35, 1073-1081.
- Hareźlak, K., Kasprowski, P., & Stasch, M. (2014, June). Idiosyncratic repeatability of calibration errors during eye tracker calibration. *In 2014 7th International Conference on Human System Interactions (HSI)* (pp. 95-100). IEEE.

## REFERENCES

- Hartridge, H., & Thomson, L. C. (1948). Methods of investigating eye movements. *The British journal of ophthalmology*, 32(9), 581.
- Hayhoe, M. M., Shrivastava, A., Mruczek, R., & Pelz, J. B. (2003). Visual memory and motor planning in a natural task. *Journal of vision*, 3(1), 6-6.
- Henderson, J. M., & Choi, W. (2015). Neural correlates of fixation duration during real-world scene viewing: evidence from fixation-related (FIRE) fMRI. *Journal of cognitive neuroscience*, 27(6), 1137-1145.
- Hendrickson, A. E., & Yuodelis, C. (1984). The morphological development of the human fovea. *Ophthalmology*, 91(6), 603-612.
- Herrebrøden, H., Espeseth, T., & Bishop, L. (2023). Mental Effort in Elite and Nonelite Rowers. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 45(4), 208-223.
- Herten, N., Otto, T., & Wolf, O. T. (2017). The role of eye fixation in memory enhancement under stress—an eye tracking study. *Neurobiology of learning and memory*, 140, 134-144.
- Holmqvist, K. (2017). Common predictors of accuracy, precision and data loss in 12 eye-trackers. *In The 7th scandinavian workshop on eye tracking* (pp. 1-25).
- Holmqvist, K., & Andersson, R. (2017). Eye tracking: A comprehensive guide to methods. *Paradigms and measures*.
- Holmqvist, K., & Blignaut, P. (2020). Small eye movements cannot be reliably measured by video-based P-CR eye-trackers. *Behavior research methods*, 52, 2098-2121.
- Holmqvist, K., Nyström, M., & Andersson, R. (2011). “*Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*”. Oxford University Press.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. OUP Oxford.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. *OUP Oxford*.

## REFERENCES

- Hooge, I. T., Hessels, R. S., & Nyström, M. (2019). Do pupil-based binocular video eye trackers reliably measure vergence? *Vision Research*, 156, 1-9.
- Hooge, I. T., Niehorster, D. C., Hessels, R. S., Benjamins, J. S., & Nyström, M. (2023). How robust are wearable eye trackers to slow and fast head and body movements? *Behavior Research Methods*, 55(8), 4128-4142.
- Hooge, I., Holmqvist, K., & Nyström, M. (2016). The pupil is faster than the corneal reflection (CR): Are video based pupil-CR eye trackers suitable for studying detailed dynamics of eye movements? *Vision research*, 128, 6-18.
- Hooge, I., Nyström, M., Cornelissen, T., & Holmqvist, K. (2015). The art of braking: Post saccadic oscillations in the eye tracker signal decrease with increasing saccade size. *Vision research*, 112, 55-67.
- Hoppe, D., Helfmann, S., & Rothkopf, C. A. (2018). Humans quickly learn to blink strategically in response to environmental task demands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2246-2251.
- Houben, M. M., Goumans, J., & van der Steen, J. (2006). Recording three-dimensional eye movements: scleral search coils versus video oculography. *Investigative ophthalmology & visual science*, 47(1), 179-187.
- Hsu, T. Y., Hsu, Y. F., Wang, H. Y., & Wang, C. A. (2021). Role of the frontal eye field in human pupil and saccade orienting responses. *European Journal of Neuroscience*, 54(1), 4283-4294.
- Hu, X., & Lodewijks, G. (2020). Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue. *Journal of safety research*, 72, 173-187.
- Huey, E. B. (1898). Preliminary experiments in the physiology and psychology of reading. *The American Journal of Psychology*, 9(4), 575-586.
- Hughes, M., & Franks, I. M. (Eds.). (2004). *Notational analysis of sport: Systems for better coaching and performance in sport*. Psychology Press.
- Hüttermann, S., Noël, B., & Memmert, D. (2018). Eye tracking in high-performance sports: Evaluation of its application in expert athletes. *International Journal of Computer Science in Sport*, 17(2), 182-203.

## REFERENCES

- Huyghe, T., Calleja-González, J., Bird, S., & Alcaraz, P. E. (2024). Pupillometry as a new window to player fatigue? A glimpse inside the eyes of a Euro Cup Women's Basketball team. *Biology of Sport*, 41(1), 3-15.
- I. (1929). Electronystagmography: A graphic study of the action currents in nystagmus. *Archives of Neurology and Behavior Research Methods Psychiatry*, 21(4), 901–918.
- Imaoka, Y., Flury, A., & De Bruin, E. D. (2020). Assessing saccadic eye movements with head-mounted display virtual reality technology. *Frontiers in Psychiatry*, 11, 572938.
- Inamdar, S., & Pomplun, M. (2003). Comparative search reveals the tradeoff between eye movements and working memory use in visual tasks. *In Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society* (Vol. 25, No. 25).
- Irving, E. L., Zacher, J. E., Allison, R. S., & Callender, M. G. (2003). Effects of scleral search coil wear on visual function. *Investigative ophthalmology & visual science*, 44(5), 1933-1938.
- Jack, S. J., & Ronan, K. R. (1998). Sensation seeking among high-and low-risk sports participants. *Personality and Individual differences*, 25(6), 1063-1083.
- Jacob, R. J. K., & Karn, K. S. (2003). "Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises". *Journal of Vision*, 3(11), 9.
- Jacob, R. J., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In *The mind's eye* (pp. 573-605). North-Holland.
- Janhofer, D. E., Lakhiani, C., & Song, D. H. (2019). Addressing surgeon fatigue: current understanding and strategies for mitigation. *Plastic and reconstructive surgery*, 144(4), 693e-699e.
- Jarodzka, H., Skuballa, I., & Gruber, H. (2021). Eye-tracking in educational practice: Investigating visual perception underlying teaching and learning in the classroom. *Educational Psychology Review*, 33(1), 1-10.
- Jaschinski, W. (2016). Pupil size affects measures of eye position in video eye tracking: implications for recording vergence accuracy. *Journal of Eye Movement Research*, 9(4).

## REFERENCES

- Jasper, H. H., & Murray, E. (1932). A study of the eye-movements of stutterers during oral reading. *Journal of Experimental Psychology*, 15(5), 528.
- Jayaramachandran, P., Proudlock, F. A., Odedra, N., Gottlob, I., & McLean, R. J. (2014). A randomized controlled trial comparing soft contact lens and rigid gas-permeable lens wearing in infantile nystagmus. *Ophthalmology*, 121(9), 1827-1836.
- Jenner, L. A., Farran, E. K., Welham, A., Jones, C., & Moss, J. (2023). The use of eye-tracking technology as a tool to evaluate social cognition in people with an intellectual disability: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 15(1), 42.
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, A., & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *Journal of neuroscience*, 21(17), 6917-6932.
- Johns, M., Crowley, K., Chapman, R., Tucker, A., & Hocking, C. (2009). The effect of blinks and saccadic eye movements on visual reaction times. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 783-788.
- Joshi, S., Li, Y., Kalwani, R. M., & Gold, J. I. (2016). Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. *Neuron*, 89(1), 221-234.
- Judd, C. H., McAllister, C. N., & Steele, W. M. (1905). General introduction to a series of studies of eye movements by means of kinetoscopic photographs. *Psychological Review Monographs*, 7(1), 1-16.
- Karim, E., Pavel, H. R., Nikanfar, S., Hebri, A., Roy, A., Nambiappan, H. R., ... & Makedon, F. (2024). Examining the Landscape of Cognitive Fatigue Detection: A Comprehensive Survey. *Technologies*, 12(3), 38.
- Kashihara, K., Okanoya, K., & Kawai, N. (2014). Emotional attention modulates microsaccadic rate and direction. *Psychological research*, 78, 166-179.
- Kasprowski, P., & Ober, J. (2004, May). Eye movements in biometrics. In *International Workshop on Biometric Authentication* (pp. 248-258). *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*.
- Kasprowski, P., Hareźlak, K., & Skurowski, P. (2019). Implicit calibration using probable fixation targets. *Sensors*, 19(1), 216.

## REFERENCES

- Kassner, M., Patera, W., & Bulling, A. (2014, September). Pupil: an open-source platform for pervasive eye tracking and mobile gaze-based interaction. *In Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing: Adjunct publication* (pp. 1151-1160).
- Kato, T. (2019). Visual Behaviors and Expertise in Race Driving Situation. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Eds.), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)* (Vol. 823, pp. 245–248). Springer.
- Katsis, C. D., Katertsidis, N., Ganiatsas, G., & Fotiadis, D. I. (2008). Toward emotion recognition in car-racing drivers: A biosignal processing approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 38(3), 502-512.
- Kiderman, A., Hoffer, M., Szczupak, M., Snapp, H., Murphy, S., Marshall, K., ... & Balaban, C. (2020). Oculomotor, vestibular, reaction time and cognitive eye-tracking mild traumatic brain injury assessment. *Neurology*, 95(20\_Supplement\_1), S2-S2.
- Kimmig, H., Greenlee, M. W., Huethe, F., & Mergner, T. (1999). MR-eyetracker: a new method for eye movement recording in functional magnetic resonance imaging. *Experimental Brain Research*, 126(3), 443-449.
- Kishita, Y., Ueda, H., & Kashino, M. (2020). Eye and head movements of elite baseball players in real batting. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 3.
- Klatt, S., Noël, B., Schwarting, A., Heckmann, L., & Fasold, F. (2021). Adaptive gaze behavior and decision making of penalty corner strikers in field hockey. *Frontiers in psychology*, 12, 674511.
- Klostermann, A. (2019). Especial skill vs. quiet eye duration in basketball free throw: Evidence for the inhibition of competing task solutions. *European journal of sport science*, 19(7), 964-971.
- Klostermann, A., Kredel, R., & Hossner, E. J. (2013). The “quiet eye” and motor performance: Task demands matter! *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(5), 1270.
- Ko, H. K., Snodderly, D. M., & Poletti, M. (2016). Eye movements between saccades: Measuring ocular drift and tremor. *Vision research*, 122, 93-104.

## REFERENCES

- Koch, K., McLean, J., Segev, R., Freed, M. A., Berry, M. J., Balasubramanian, V., & Sterling, P. (2006). How much the eye tells the brain. *Current biology*, 16(14), 1428-1434.
- Konstantopoulos, P., Chapman, P., & Crundall, D. (2010). Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. Using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 827-834.
- Kountouriotis, G. K., Floyd, R. C., Gardner, P. H. et al. (2012). The role of gaze and road edge information during high-speed locomotion. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 38: 687-702.
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25 years. *Vision research*, 51(13), 1457-1483.
- Krabben, K., Mann, D., Lojanica, M., Mueller, D., Dominici, N., van der Kamp, J., & Savelsbergh, G. (2022). How wide should you view to fight? Establishing the size of the visual field necessary for grip fighting in judo. *Journal of Sports Sciences*, 40(2), 236-247.
- Krafka, K., Khosla, A., Kellnhofer, P., Kannan, H., Bhandarkar, S., Matusik, W., & Torralba, A. (2016). Eye tracking for everyone. *In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2176-2184).
- Kredel, R., Hernandez, J., Hossner, E. J., & Zahno, S. (2023). Eye-tracking technology and the dynamics of natural gaze behavior in sports: an update 2016–2022. *Frontiers in Psychology*, 14, 1130051.
- Kredel, R., Vater, C., Klostermann, A., & Hossner, E. J. (2017). Eye-tracking technology and the dynamics of natural gaze behavior in sports: A systematic review of 40 years of research. *Frontiers in psychology*, 8, 1845.
- Kredel, R., Vater, C., Klostermann, A., & Hossner, E. J. (2017). Eye-tracking technology and the dynamics of natural gaze behavior in sports: A systematic review of 40 years of research. *Frontiers in psychology*, 8, 287392.
- Krejtz, K., Duchowski, A. T., Niedzielska, A., Biele, C., & Krejtz, I. (2018). Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze. *PloS one*, 13(9), e0203629.
- Kronsbein, H., Oehmichen, M., & Kömpf, D. (1994). Effect of low dose alcohol concentration on saccadic eye movements. Infrared reflection technique for

## REFERENCES

- recording oculomotor reactions with reference to dangerous traffic situations. *Blutalkohol*, 31(2), 57-75.
- Kurzhals, K., & Weiskopf, D. (2013). Space-time visual analytics of eye-tracking data for dynamic stimuli. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12), 2129-2138.
  - Laby, D. M., & Appelbaum, L. G. (2021). Vision and on-field performance: a critical review of visual assessment and training studies with athletes. *Optometry and Vision Science*, 98(7), 723-731.
  - Laeng, B., & Alnaes, D. (2019). Pupillometry. *Eye Movement Research: An Introduction to its Scientific Foundations and Applications*, 449-502.
  - Laeng, B., Sirois, S., & Gredebäck, G. (2012). Pupillometry: A window to the preconscious? *Perspectives on psychological science*, 7(1), 18-27.
  - Lagmay, E. A. D., & Rodrigo, M. M. T. (2022). Enhanced Automatic Areas of Interest (AOI) Bounding Boxes Estimation Algorithm for Dynamic Eye-Tracking Stimuli. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 11(1).
  - Land, M. (2015). Focusing by shape change in the lens of the eye: a commentary on Young (1801) 'On the mechanism of the eye'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1666), 20140308.
  - Land, M. F., & Tatler, B. W. (2001). Steering with the head: The visual strategy of a racing driver. *Curr Biol.*, 11: 1215±1220.
  - Land, M., & Tatler, B. (2009). Looking and acting: Vision and eye movements in natural behaviour. *Oxford University Press*.
  - Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, 28(11), 1311-1328.
  - Lappi, O. (2014). Future path and tangent point models in the visual control of locomotion in curve driving. *J Vis*, 14:21.
  - Lappi, O. (2015). The racer's brain how domain expertise is reflected in the neural substrates of driving. *Front Hum Neurosci*, 9:635.
  - Lappi, O. (2022). Gaze strategies in driving—an ecological approach. *Frontiers in psychology*, 13, 821440.

## REFERENCES

- Lappi, O., & Mole, C. (2018). Visuomotor control, eye movements, and steering: A unified approach for incorporating feedback, feedforward, and internal models. *Psychological bulletin*, 144(10), 981.
- Larrazabal, A. J., Cena, C. G., & Martínez, C. E. (2019). Video-oculography eye tracking towards clinical applications: A review. *Computers in biology and medicine*, 108, 57-66.
- Larsen, R. S., & Waters, J. (2018). Neuromodulatory correlates of pupil dilation. *Frontiers in neural circuits*, 12, 21.
- Larsson, L., Nyström, M., & Stridh, M. (2013). Detection of saccades and postsaccadic oscillations in the presence of smooth pursuit. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 60(9), 2484-2493.
- Laughlin, S. B. (1992). Retinal information capacity and the function of the pupil. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12(2), 161-164.
- Lavie, N., Beck, D. M., & Konstantinou, N. (2014). Blinded by the load: attention, awareness and the role of perceptual load. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1641), 20130205.
- Leigh, R. J., & Zee, D. S. (2015). *The neurology of eye movements*. Contemporary Neurology.
- Lev, A., Braw, Y., Elbaum, T., Wagner, M., & Rassevsky, Y. (2022). Eye tracking during a continuous performance test: Utility for assessing ADHD patients. *Journal of Attention Disorders*, 26(2), 245-255.
- Levi, D. M., Klein, S. A., & Aitsebaomo, A. P. (1985). Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision research*, 25(7), 963-977.
- Levy, D. L., Mendell, N. R., & Holzman, P. S. (2004). The antisaccade task and neuropsychological tests of prefrontal cortical integrity in schizophrenia: empirical findings and interpretative considerations. *World psychiatry*, 3(1), 32.
- Li, D., Butala, A. A., Moro-Velazquez, L., Meyer, T., Oh, E. S., Motley, C., ... & Dehak, N. (2023). Automating the analysis of eye movement for different neurodegenerative disorders. *medRxiv*, 2023-05.
- Liu, H., & Heynderickx, I. (2011). Visual attention in objective image quality assessment: Based on eye-tracking data. *IEEE transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 21(7), 971-982.

## REFERENCES

- Liu, X., Xu, F., & Fujimura, K. (2002, June). Real-time eye detection and tracking for driver observation under various light conditions. *In Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE* (Vol. 2, pp. 344-351). IEEE.
- Liversedge S, Gilchrist I, Everling S (2011) The Oxford handbook of eye movements. *Oxford University Press*, Oxford.
- Liversedge, S. P. (2009). Abstracts of the 15th European Conference on Eye Movements 2009. *Journal of Eye Movement Research*, 3(6).
- Loiseau-Taupin, M., Ruffault, A., Slawinski, J., Delabarre, L., & Bayle, D. (2021). Effects of acute physical fatigue on gaze behavior and performance during a badminton game. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3, 725625.
- Lord, M. P., & Wright, W. D. (1948). Eye movements during monocular fixation. *Nature*, 162(4105), 25-26.
- Lounis, C., Peysakhovich, V., & Causse, M. (2021). Visual scanning strategies in the cockpit are modulated by pilots' expertise: A flight simulator study. *PLoS one*, 16(2), e0247061.
- Ma, Y., Qi, S., Zhang, Y., Lian, G., Lu, W., & Chan, C. Y. (2020). Drivers' visual attention characteristics under different cognitive workloads: An on-road driving behavior study. *International journal of environmental research and public health*, 17(15), 5366.
- MacDOUGALL, H. G., & Moore, S. T. (2005). Functional assessment of head–eye coordination during vehicle operation. *Optometry and Vision Science*, 82(8), 706-715.
- Mann, D. L., Nakamoto, H., Logt, N., Sikkink, L., & Brenner, E. (2019). Predictive eye movements when hitting a bouncing ball. *Journal of vision*, 19(14), 28-28.
- Mann, D. L., Spratford, W., & Abernethy, B. (2013). The head tracks and gaze predicts: how the world's best batters hit a ball. *PloS one*, 8(3), e58289.
- Mann, D. T., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: A meta-analysis. *Journal of sport and exercise psychology*, 29(4), 457-478.

## REFERENCES

- Mansfield, N. J., & Marshall, J. M. (2001). Symptoms of musculoskeletal disorders in stage rally drivers and co-drivers. *British Journal of Sports Medicine*, 35(5), 314–320.
- Marquart, G., Cabrall, C., & de Winter, J. (2015). Review of eye-related measures of drivers' mental workload. *Procedia Manuf*, 3:32854-61.
- Martin, J. T., Whittaker, A. H., & Johnston, S. J. (2022). Pupillometry and the vigilance decrement: Task-evoked but not baseline pupil measures reflect declining performance in visual vigilance tasks. *European journal of neuroscience*, 55(3), 778-799.
- Massin, L., Nourrit, V., Lahuec, C., Seguin, F., Adam, L., & Daniel, E. (2020). Development of a new scleral contact lens with encapsulated photodetectors for eye tracking. *Optics Express*, 28(19), 28635-28647.
- Mathôt, S. (2018a). Pupillometry: Psychology, physiology, and function. *Journal of Cognition*, 1(1).
- Mathôt, S., Fabius, J., Van Heusden, E., & Van der Stigchel, S. (2018b). Safe and sensible preprocessing and baseline correction of pupil-size data. *Behavior research methods*, 50, 94-106.
- Mathôt, S., Grainger, J., & Strijkers, K. (2017). Pupillary responses to words that convey a sense of brightness or darkness. *Psychological science*, 28(8), 1116-1124.
- Mathôt, S., Melmi, J. B., Van Der Linden, L., & Van der Stigchel, S. (2016). The mind-writing pupil: a human-computer interface based on decoding of covert attention through pupillometry. *PloS one*, 11(2), e0148805.
- McCamy, M. B., Collins, N., Otero-Millan, J., Al-Kalbani, M., Macknik, S. L., Coakley, D., Martinez-Conde, S. (2013). Simultaneous recordings of ocular microtremor and microsaccades with a piezoelectric sensor and a video-oculography system. *PeerJ*, 1, e14.
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, 17, 578-586.
- McConkie, G. W., Zola, D., Wolverton, G. S., & Burns, D. D. (1978). Eye movement contingent display control in studying reading. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 10(2), 154-166.

## REFERENCES

- McKnight, A. J., & McKnight, A. S. (2003). Young novice drivers: careless or clueless?. *Accident Analysis & Prevention*, 35(6), 921-925.
- Meeusen, R., Van Cutsem, J., & Roelands, B. (2021). *Endurance exercise-induced and mental fatigue and the brain*. *Experimental physiology*, 106(12), 2294-2298.
- Menekse Dalveren, G. G., & Cagiltay, N. E. (2020). Distinguishing intermediate and novice surgeons by eye movements. *Frontiers in Psychology*, 11, 542752.
- Merchant, J. (1967). *The oculometer* (No. NASA-CR-805).
- Micheli, M., Massardi, S., Morzenti, S., Pasinetti, S., Briamonte, C., & Lancini, M. (2020, June). Performance assessment in clay pigeon shooting using machine vision for gaze detection. In 2020 *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT* (pp. 111-115). IEEE.
- Milton, J., Solodkin, A., Hluštík, P., & Small, S. L. (2007). The mind of expert motor performance is cool and focused. *Neuroimage*, 35(2), 804-813.
- Min-Allah, N., Jan, F., & Alrashed, S. (2021). Pupil detection schemes in human eye: a review. *Multimedia Systems*, 27(4), 753-777.
- Misra, A., Samuel, S., Cao, S., & Shariatmadari, K. (2023). Detection of driver cognitive distraction using machine learning methods. *IEEE Access*, 11, 18000-18012.
- Moghimi, M., Azagra, P., Montesano, L., Murillo, A. C., & Belongie, S. (2014). Experiments on an rgb-d wearable vision system for egocentric activity recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops* (pp. 597-603).
- Morad, Y., Lemberg, H., Yofe, N., & Dagan, Y. (2000). Pupillography as an objective indicator of fatigue. *Current eye research*, 21(1), 535-542.
- Moran A, Campbell M, Ranieri D (2018) Implications of eye tracking technology for applied sport psychology. *J Sport Psychol Action* 9:249–259.
- Moran, A., Campbell, M., & Ranieri, D. (2018). Implications of eye tracking technology for applied sport psychology. *Journal of Sport Psychology in Action*, 9(4), 249-259.
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1970). Mapping eye-movement patterns to the visual scene in driving: An exploratory study. *Human factors*, 12(1), 81-87.

## REFERENCES

- Murch, W. S., Limbrick-Oldfield, E. H., Ferrari, M. A., MacDonald, K. I., Fookien, J., Cherkasova, M. V., ... & Clark, L. (2020). Zoned in or zoned out? Investigating immersion in slot machine gambling using mobile eye-tracking. *Addiction*, 115(6), 1127-1138.
- Murray, N. P., & Janelle, C. M. (2003). Anxiety and performance: A visual search examination of the processing efficiency theory. *Journal of Sport and Exercise psychology*, 25(2), 171-187.
- Murray, N. P., Trotter, B. M., Heidner, G. S., Herman, C., & Hunfalvay, M. (2022). Eye Tracker Outcomes from Static, Mobile, Virtual Reality Eye Tracking Devices. In *Eye Tracking: Background, Methods, and Applications* (pp. 113-129). New York, NY: Springer US.
- Naeeri, S., Kang, Z., Mandal, S., & Kim, K. (2021). Multimodal analysis of eye movements and fatigue in a simulated glass cockpit environment. *Aerospace*, 8(10), 283.
- Næss, H. E., & Næss, H. E. (2020). Into the Modern Era of Sport: 1946–1981. A History of Organizational Change: The case of Fédération Internationale de l'Automobile (FIA), 1946–2020, 27-85.
- Nagamatsu, T., Kamahara, J., & Tanaka, N. (2009). Calibration-free gaze tracking using a binocular 3D eye model. In *CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 3613-3618).
- Nakashima, R., Fang, Y., Hatori, Y., Hiratani, A., Matsumiya, K., Kuriki, I., & Shioiri, S. (2015). Saliency-based gaze prediction based on head direction. *Vision research*, 117, 59-66.
- Nakata, H., Yoshie, M., Miura, A., & Kudo, K. (2010). Characteristics of the athletes' brain: evidence from neurophysiology and neuroimaging. *Brain research reviews*, 62(2), 197-211.
- Narcizo, F. B., Ahmed, Z., & Hansen, D. W. (2017, August). Using priors to compensate geometrical problems in head-mounted eye trackers. In *19th European Conference on Eye Movements*.
- Newell, B. R., Lagnado, D. A., & Shanks, D. R. (2022). Straight choices: The psychology of decision making. Psychology Press.

## REFERENCES

- Niehorster, D. C., Santini, T., Hessels, R. S., Hooge, I. T., Kasneci, E., & Nyström, M. (2020). The impact of slippage on the data quality of head-worn eye trackers. *Behavior research methods*, 52, 1140-1160.
- Niehorster, D. C., Hessels, R. S., Benjamins, J. S., Nyström, M., & Hooge, I. T. (2024). GlassesValidator: A data quality tool for eye tracking glasses. *Behavior research methods*, 56(3), 1476-1484.
- Nishizono, R., Saijo, N., & Kashino, M. (2021, May). Synchronization of spontaneous eyeblink during formula car driving. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (pp. 1-6).
- Nomura, R., & Maruno, S. (2019). Rapid serial blinks: An index of temporally increased cognitive load. *PloS one*, 14(12), e0225897.
- Nyström, M., & Holmqvist, K. (2010). An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data. *Behavior research methods*, 42(1), 188-204.
- Ober, J., Hajda, J., Loska, J., & Jamicki, M. (1997, August). Application of eye movement measuring system OBER 2 to medicine and technology. In *Infrared technology and applications XXIII* (Vol. 3061, pp. 327-336). SPIE.
- O'Driscoll, G. A., Alpert, N. M., Matthyse, S. W., Levy, D. L., Rauch, S. L., & Holzman, P. (1995). Functional neuroanatomy of antisaccade eye movements investigated with positron emission tomography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(3), 925-929.
- Orquin, J. L., & Mueller Loose, S. (2013). Attention and choice: a review on eye movements in decision making. *Acta Psychol (Amst)*, 144:190-206.
- Orquin, J. L., Ashby, N. J., & Clarke, A. D. (2016). Areas of interest as a signal detection problem in behavioral eye-tracking research. *Journal of Behavioral Decision Making*, 29(2-3), 103-115.
- Owen, N., King, H., & Lamb, M. (2015). Literature review of race driver fatigue measurement in endurance motorsport. *Procedia Eng*, 112: 344-8.
- Pacherie, E., & Mylopoulos, M. (2021). Beyond automaticity: The psychological complexity of skill. *Topoi*, 40(3), 649-662.
- Palinko, O., & Kun, A. L. (2012, March). Exploring the effects of visual cognitive load and illumination on pupil diameter in driving simulators. In *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (pp. 413-416).

## REFERENCES

- Panchuk, D., & Vickers, J. N. (2006). Gaze behaviors of goaltenders under spatial–temporal constraints. *Human movement science*, 25(6), 733-752.
- Panetta, K., Wan, Q., Kaszowska, A., Taylor, H. A., & Agaian, S. (2019). Software architecture for automating cognitive science eye-tracking data analysis and object annotation. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(3), 268-277.
- Panetta, K., Wan, Q., Rajeev, S., Kaszowska, A., Gardony, A. L., Naranjo, K., ... & Agaian, S. (2020). Iseecolor: method for advanced visual analytics of eye tracking data. *IEEE Access*, 8, 52278-52287.
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International journal of human-computer studies*, 59(1-2), 185-198.
- Patrick, M., & Anshel, S. (2018). The importance of eye tracking in augmented reality (AR) and virtual reality (VR). *Moor Insights & Strategy*.
- Pattyn, N., Van Cutsem, J., Dessy, E., & Mairesse, O. (2018). Bridging exercise science, cognitive psychology, and medical practice: Is “cognitive fatigue” a remake of “the emperor’s new clothes”? *Frontiers in Psychology*, 9, 371410.
- Peacock, C. E., Hayes, T. R., & Henderson, J. M. (2019). Meaning guides attention during scene viewing, even when it is irrelevant. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81, 20-34.
- Pedrotti, M., Benedetto, S., Baccino, T., Re, A., Montanari, R., & Minin, L. (2011). Driver workload: a detailed analysis of eye blinks duration. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(3), 199-208.
- Pelz, J. B., Canosa, R., & Babcock, J. (2000, November). Extended tasks elicit complex eye movement patterns. *In Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications* (pp. 37-43).
- Peterson, S. M., Furuichi, E., & Ferris, D. P. (2018). Effects of virtual reality high heights exposure during beam-walking on physiological stress and cognitive loading. *PloS one*, 13(7), e0200306.
- Pfiffelmann, J., Dens, N., & Soulez, S. (2020). Personalized advertisements with integration of names and photographs: An eye-tracking experiment. *Journal of Business Research*, 111, 196-207.

## REFERENCES

- Picanço, C. R., & Tonneau, F. (2018). A low-cost platform for eye-tracking research: Using Pupil© in behavior analysis. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 110(2), 157-170.
- Piechulla, W., Mayser, C., Gehrke, H., & König, W. (2003). Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man-machine interface. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 6(4), 233-248.
- Pignoni, G., & Komandur, S. (2019). Development of a quantitative evaluation tool of cognitive workload in field studies through eye tracking. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 16th International Conference, EPCE 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019, Orlando, FL, USA, July 26–31, 2019, Proceedings 21* (pp. 106-122). Springer International Publishing.
- Piras, A., Pierantozzi, E., & Squatrito, S. (2014). Visual search strategy in judo fighters during the execution of the first grip. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 9(1), 185-198.
- Poletti, M., & Rucci, M. (2016). A compact field guide to the study of microsaccades: Challenges and functions. *Vision research*, 118, 83-97.
- Poole, A., & Ball, L. J. (2006). "Eye tracking in HCI and usability research". *Encyclopedia of Human Computer Interaction*, 1, 211-219.
- Poole, A., & Ball, L. J. (2006). *Eye tracking in HCI and usability research*. In *Encyclopedia of human computer interaction* (pp. 211-219). IGI global.
- Popa, L., Selejan, O., Scott, A., Mureşanu, D. F., Balea, M., & Rafila, A. (2015). Reading beyond the glance: eye tracking in neurosciences. *Neurological Sciences*, 36(5), 683-688.
- Potkanowicz, E. S., & Mendel, R. W. (2013). The case for driver science in motorsport: A review and recommendations. *Sports Med*, 43: 565-74.
- Potkanowicz, E. S., & Mendel, R. W. (2013). The case for driver science in motorsport: a review and recommendations. *Sports medicine*, 43, 565-574.
- Pouget, P. (2015). The cortex is in overall control of 'voluntary' eye movement. *Eye*, 29(2), 241-245.

## REFERENCES

- Pradhan, A. K., Pollatsek, A., Knodler, M., & Fisher, D. L. (2009). Can younger drivers be trained to scan for information that will reduce their risk in roadway traffic scenarios that are hard to identify as hazardous? *Ergonomics*, 52(6), 657-673.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., et al. (Eds.). (2001). *Types of Eye Movements and Their Functions*. In Neuroscience (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Putnam, N. M., Hofer, H. J., Doble, N., Chen, L., Carroll, J., & Williams, D. R. (2005). The locus of fixation and the foveal cone mosaic. *Journal of vision*, 5(7), 3-3.
- Raab, E. L. (1985). Normal saccadic velocities. *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 22(1), 20-22.
- Raghavendran, S., & Vadivel, K. D. (2023, September). Corneal reflection-based eye tracking technology to overcome the limitations of infrared rays-based eye tracking. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2831, No. 1)*. AIP Publishing.
- Ranti, C., Jones, W., Klin, A., & Shultz, S. (2020). Blink rate patterns provide a reliable measure of individual engagement with scene content. *Scientific reports*, 10(1), 8267.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3), 372.
- Reilly, J., Kelly, A., Kim, S. H., Jett, S., & Zuckerman, B. (2019). The human task-evoked pupillary response function is linear: Implications for baseline response scaling in pupillometry. *Behavior research methods*, 51, 865-878.
- Reulen, J. P. H., & Bakker, L. (1982). The measurement of eye movement using double magnetic induction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, (11), 740-744.
- Ripoll, H., Kerlirzin, Y., Stein, J. F., & Reine, B. (1995). Analysis of information processing, decision making, and visual strategies in complex problem-solving sport situations. *Human movement science*, 14(3), 325-349.
- Rito Lima, I., Haar, S., Di Grassi, L., & Faisal, A. A. (2020). Neurobehavioural signatures in race car driving: a case study. *Scientific reports*, 10(1), 11537.

## REFERENCES

- Robbins, C., & Chapman, P. (2019). How does drivers' visual search change as a function of experience? A systematic review and meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 105266.
- Robinson D (1965) The mechanics of human smooth pursuit eye movement. *J Physiol* 180: 569–591.
- Robinson, D. A. (1963). A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Transactions on bio-medical electronics*, 10(4), 137-145.
- Robinson, D. A. (2022). Behavior of the saccadic system: Metrics of timing and accuracy. *Progress in brain research*, 267(1), 329-353.
- Rockwell, T. H., Overby, C., & Mourant, R. R. (1968). Drivers' eye movements: An apparatus and calibration. *Highway Research Record*, 247, 29-42.
- Rodemer, M., Karch, J., & Bernholt, S. (2023, April). Pupil dilation as cognitive load measure in instructional videos on complex chemical representations. *In Frontiers in Education* (Vol. 8, p. 1062053). Frontiers.
- Rodríguez-Labrada, R., Velázquez-Pérez, L., Seigfried, C., Canales-Ochoa, N., Auburger, G., Medrano-Montero, J., ... & Quevedo-Batista, Y. (2011). Saccadic latency is prolonged in Spinocerebellar Ataxia type 2 and correlates with the frontal-executive dysfunctions. *Journal of the neurological sciences*, 306(1-2), 103-107.
- Roelands, B. (2022). Brain research into the mechanisms and consequences of mental fatigue. *Performance Enhancement & Health*, 10(4), 100239.
- Roelands, B., Kelly, V., Russell, S., & Habay, J. (2021). The physiological nature of mental fatigue: current knowledge and future avenues for sport science. *International journal of sports physiology and performance*, 17(2), 149-150.
- Roi, G. S., & Bianchedi, D. (2008). The science of fencing: implications for performance and injury prevention. *Sports medicine*, 38, 465-481.
- Rouse, M. W., DeLand, P., Christian, R., & Hawley, J. (1988). A comparison study of dynamic visual acuity between athletes and nonathletes. *Journal of the American Optometric Association*, 59(12), 946–950.
- Rucci M, Poletti M (2015) Control and functions of fixational eye movements. *Ann Rev Vision Sci* 1:499–518.

## REFERENCES

- Rucci, M., Wu, R.-J., & Zhao, Z. (2020). System and method for real-time high-resolution eye-tracking. Google Patents. (US PatentApp. 16/550,831).
- Russell, S., Jenkins, D. G., Halson, S. L., Juliff, L. E., Connick, M. J., & Kelly, V. G. (2021). Mental fatigue over 2 elite netball seasons: a case for mental fatigue to be included in athlete self-report measures. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(2), 160-169.
- Sabra, A. I. (1981). *Theories of light: from Descartes to Newton*. Cambridge University Press.
- Santini, T., Fuhl, W., & Kasneci, E. (2018). PuRe: Robust pupil detection for real-time pervasive eye tracking. *Computer Vision and Image Understanding*, 170, 40-50.
- Schiphof-Godart, L., Roelands, B., & Hettinga, F. J. (2018). Drive in sports: How mental fatigue affects endurance performance. *Frontiers in psychology*, 9, 360941.
- Schmitt, K. U., Seeger, R., Fischer, H., Lanz, C., Muser, M., Walz, F., & Schwarz, U. (2015). Saccadic eye movement performance as an indicator of driving ability in elderly drivers. *Swiss medical weekly*, 145, w14098.
- Schmitt, L. M., Cook, E. H., Sweeney, J. A., & Mosconi, M. W. (2014). Saccadic eye movement abnormalities in autism spectrum disorder indicate dysfunctions in cerebellum and brainstem. *Molecular autism*, 5(1), 1-13.
- Schneider, E., Villgrattner, T., Vockeroth, J., Bartl, K., Kohlbecher, S., Bardins, S., ... & Brandt, T. (2009). Eyeseecam: An eye movement-driven head camera for the examination of natural visual exploration. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164(1), 461-467.
- Schneiders, A. G., Sullivan, S. J., Rathbone, E. J., Louise Thayer, A., Wallis, L. M., & Wilson, A. E. (2010). Visual acuity in young elite motorsport athletes: a preliminary report. *Physical therapy in sport: official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 11(2), 47-49. doi: 10.1016/j.ptsp.2010.01.001.

## REFERENCES

- Schott, E. (1922). U"ber die Registrierung des Nystagmus und anderer Augenbewegungen vermittels des Saitengalvanometers. *Deutsches Archiv fur Klinische Medizin*, 140, 79–90.
- Schroeder, C. E., Wilson, D. A., Radman, T., Scharfman, H., & Lakatos, P. (2010). Dynamics of active sensing and perceptual selection. *Current opinion in neurobiology*, 20(2), 172-176.
- Semmelmann, K., & Weigelt, S. (2018). Online webcam-based eye tracking in cognitive science: A first look. *Behavior Research Methods*, 50, 451-465.
- Sharafi, Z., Sharif, B., Guéhéneuc, Y. G., Begel, A., Bednarik, R., & Crosby, M. (2020). A practical guide on conducting eye tracking studies in software engineering. *Empirical Software Engineering*, 25, 3128-3174.
- Shehu, I. S., Wang, Y., Athuman, A. M., & Fu, X. (2021). Remote eye gaze tracking research: a comparative evaluation on past and recent progress. *Electronics*, 10(24), 3165.
- Shenoy, J., Fong, J., Tan, J., Roorda, A., & Ng, R. (2021). R-SLAM: Optimizing eye tracking from rolling shutter video of the retina. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 4852-4861).
- Shinar, D., McDowell, E. D., & Rockwell, T. H. (1977). Eye movements in curve negotiation. *Human Factors*, 19(1), 63-71.
- Shultz, S., Klin, A., & Jones, W. (2011). Inhibition of eye blinking reveals subjective perceptions of stimulus salience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(52), 21270-21275.
- Sibley, C., Coyne, J., & Baldwin, C. (2011, September). Pupil dilation as an index of learning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 55, No. 1, pp. 237-241). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Silva, A. F., Afonso, J., Sampaio, A., Pimenta, N., Lima, R. F., Castro, H. D. O., ... & Murawska-Ciałowicz, E. (2022). Differences in visual search behavior between expert and novice team sports athletes: A systematic review with meta-analysis. *Frontiers in psychology*, 13, 1001066.
- Simmonds, L., Bellman, S., Kennedy, R., Nenycz-Thiel, M., & Bogomolova, S. (2020). Moderating effects of prior brand usage on visual attention to video

## REFERENCES

- advertising and recall: An eye-tracking investigation. *Journal of Business Research*, 111, 241-248.
- Simon, G. (1975). 14.3. On the theory of visual perception of Kepler and Descartes: reflections on the role of mechanism in the birth of modern science. *Vistas in Astronomy*, 18, 825-832.
  - Sippel, K., Kasneci, E., Aehling, K., Heister, M., Rosenstiel, W., Schiefer, U., & Papageorgiou, E. (2014). Binocular glaucomatous visual field loss and its impact on visual exploration-a supermarket study. *PloS one*, 9(8), e106089.
  - Sij, D., Chauhan, S. S., Shekhawat, B. S., Kumar, L., & Ghosh, S. (2024, January). Real-time eye tracking using representation learning and regression. *In Proceedings of the 7th Joint International Conference on Data Science & Management of Data (11th ACM IKDD CODS and 29th COMAD)* (pp. 298-306).
  - Smeets, J. B., Hayhoe, M. M., & Ballard, D. H. (1996). Goal-directed arm movements change eye-head coordination. *Experimental brain research*, 109, 434-440.
  - Smyrnis, N., Malogiannis, I. A., Evdokimidis, I., Stefanis, N. C., Theleritis, C., Vaidakis, A., ... & Stefanis, C. N. (2004). Attentional facilitation of response is impaired for antisaccades but not for saccades in patients with schizophrenia: implications for cortical dysfunction. *Experimental brain research*, 159, 47-54.
  - Sudkamp, J., Bocian, M., & Souto, D. (2021). The role of eye movements in perceiving vehicle speed and time-to-arrival at the roadside. *Scientific reports*, 11(1), 23312.
  - Sugano, Y., & Bulling, A. (2015, November). Self-calibrating head-mounted eye trackers using egocentric visual saliency. *In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology* (pp. 363-372).
  - Sullivan, B., Ludwig, C. J., Damen, D., Mayol-Cuevas, W., & Gilchrist, I. D. (2021). Look-ahead fixations during visuomotor behavior: Evidence from assembling a camping tent. *Journal of vision*, 21(3), 13-13.
  - Swann, C., Moran, A., & Piggott, D. (2015). Defining elite athletes: Issues in the study of expert performance in sport psychology. *Psychology of sport and exercise*, 16, 3-14.

## REFERENCES

- Świrski, L., Bulling, A., & Dodgson, N. (2012, March). Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images. *In Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications* (pp. 173-176).
- Torok, N., Guillemin, V., & Barnothy, J. M. (1951). Photoelectric nystagmography. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, 60(4), 917–926.
- Taggart, P., & Gibbons, D. (1967). Motor-car driving and the heart rate. *British Medical Journal*, 1(5537), 411.
- Takarae, Y., Minshew, N. J., Luna, B., Krisky, C. M., & Sweeney, J. A. (2004). Pursuit eye movement deficits in autism. *Brain*, 127(12), 2584-2594.
- Takarae, Y., Minshew, N. J., Luna, B., Krisky, C. M., & Sweeney, J. A. (2004). Pursuit eye movement deficits in autism. *Brain*, 127(12), 2584-2594.
- Tang, Y., Tian, Y., Lu, J., Feng, J., & Zhou, J. (2017, September). Action recognition in rgb-d egocentric videos. *In 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 3410-3414). IEEE.
- Tecce, J. J., Gips, J., Olivieri, C. P., Pok, L. J., & Consiglio, M. R. (1998). Eye movement control of computer functions. *International Journal of Psychophysiology*, 29(3), 319-325.
- Thiele, A., Henning, P., Kubischik, M., & Hoffmann, K. P. (2002). Neural mechanisms of saccadic suppression. *Science*, 295(5564), 2460-2462.
- Titz, J., Scholz, A., & Sedlmeier, P. (2018). Comparing eye trackers by correlating their eye-metric data. *Behavior Research Methods*, 50, 1853-1863.
- Träisk, F., Bolzani, R., & Ygge, J. (2005). A comparison between the magnetic scleral search coil and infrared reflection methods for saccadic eye movement analysis. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 243, 791-797.
- Treue, S. (2001). Neural correlates of attention in primate visual cortex. *Trends in neurosciences*, 24(5), 295-300.
- Turner, A. P., & Richards, H. (2015). Physiological and selective attention demands during an international rally motor sport event. *BioMed research international*, 2015.

## REFERENCES

- Ukwade, M. T., & Bedell, H. E. (1992). Variation of congenital nystagmus with viewing distance. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 69(12), 976-985.
- Underwood, G. (2007). Visual attention and the transition from novice to advanced driver. *Ergonomics*, 50(8), 1235-1249.
- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K., & Crundall, D. (2002). Visual search while driving: skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(2), 87-97.
- Underwood, G., Crundall, D., & Chapman, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transp Res Part F Traffic Psychol Behav*, 14, 435-46.
- Underwood, G., Templeman, E., Lamming, L., & Foulsham, T. (2008). Is attention necessary for object identification? Evidence from eye movements during the inspection of real-world scenes. *Consciousness and cognition*, 17(1), 159-170.
- Unema, P. J., Pannasch, S., Joos, M., & Velichkovsky, B. M. (2005). Time course of information processing during scene perception: The relationship between saccade amplitude and fixation duration. *Visual cognition*, 12(3), 473-494.
- Van Biemen, T., Oudejans, R. R. D., Savelsbergh, G. J. P., Zwenk, F., & Mann, D. L. (2023). Into the eyes of the referee: A comparison of elite and sub-elite football referees' on-field visual search behaviour when making foul judgements. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 18(1), 78-90.
- Van Cutsem, J., & Marcora, S. (2021). The effects of mental fatigue on sport performance: an update. In *Motivation and self-regulation in sport and exercise* (pp. 134-148). Routledge.
- Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The effects of mental fatigue on physical performance: a systematic review. *Sports medicine*, 47, 1569-1588.
- Van Leeuwen, P. M., De Groot, S., Happee, R., & De Winter, J. C. (2017). Differences between racing and non-racing drivers: A simulator study using eye-tracking. *PLoS one*, 12(11), e0186871.

## REFERENCES

- Van Orden, K. F., Limbert, W., Makeig, S., & Jung, T. P. (2001). Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task. *Human factors*, 43(1), 111-121.
- Vargas-Cuentas, N. I., Roman-Gonzalez, A., Gilman, R. H., Barrientos, F., Ting, J., Hidalgo, D., ... & Zimic, M. (2017). Developing an eye-tracking algorithm as a potential tool for early diagnosis of autism spectrum disorder in children. *PloS one*, 12(11), e0188826.
- Vetturi, D., Tiboni, M., Maternini, G., & Bonera, M. (2020). Use of eye tracking device to evaluate the driver's behaviour and the infrastructures quality in relation to road safety. *Transportation research procedia*, 45, 587-595.
- Vickers, J. N. (1996). Control of visual attention during the basketball free throw. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(6\_suppl), S93-S97.
- Vickers, J. N. (1996). Visual control when aiming at a far target. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 22(2), 342.
- Vickers, J. N. (2007). Perception, cognition, and decision training: *The quiet eye in action*. *Human Kinetics*.
- Villanueva, A., & Cabeza, R. (2008). A novel gaze estimation system with one calibration point. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 38(4), 1123-1138.
- Villanueva, A., & Cabeza, R. (2008). Evaluation of corneal refraction in a model of a gaze tracking system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(12), 2812-2822.
- Vincze, A., Jurchis, R., & Iliescu, D. (2022). Quiet eye facilitates processing complex information in elite table tennis players. *Visual Cognition*, 30(7), 506-516.
- Wade NJ, Tatler BW, Heller D (2003) Dodgeing the issue: dodge, javal, hering, and the measurement of saccades in eye-movement research. *Perception* 32:793–804.
- Wade, N. J. (2000). Porterfield and Wells on the motions of our eyes. *Perception*, 29(2), 221-239.

## REFERENCES

- Wade, N. J. (2007). *The vision of William porterfield. In Brain, Mind and Medicine: Essays in Eighteenth-Century Neuroscience* (pp. 163-176). Boston, MA: Springer US.
- Wade, N. J. (2010). Pioneers of eye movement research. *i-Perception*, 1(2), 33-68.
- Wade, N. J., & Piccolino, M. (2009). Seeing stars. *Perception*, 38(11), 1581-1584.
- Wade, N. J., Ono, H., Mapp, A. P., & Lillakas, L. (2011). The singular vision of William Charles Wells (1757–1817). *Journal of the History of the Neurosciences*, 20(1), 1-15.
- Wade, N. J., Tatler, B. W., & Heller, D. (2003). Dodge-ing the issue: Dodge, Javal, Hering, and the measurement of saccades in eye-movement research. *Perception*, 32(7), 793-804.
- Walker, S. M., Dawson, B., & Ackland, T. R. (2001). Performance enhancement in rally car drivers via heat acclimation and race simulation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 128(4), 701-707.
- Wan, Q., Kaszowska, A., Panetta, K., Taylor, H. A., and Agaian, S. (2019). A comprehensive head-mounted eye tracking review: software solutions, applications, and challenges. *Electron. Imaging* 2019, 654–651.
- Wang, C. A., & Munoz, D. P. (2018). Neural basis of location-specific pupil luminance modulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(41), 10446-10451.
- Wang, C. A., & Munoz, D. P. (2021). Coordination of pupil and saccade responses by the superior colliculus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(5), 919-932.
- Wang, C. A., Boehnke, S. E., White, B. J., & Munoz, D. P. (2012). Microstimulation of the monkey superior colliculus induces pupil dilation without evoking saccades. *Journal of Neuroscience*, 32(11), 3629-3636.
- Wang, J., Zhai, G., & Duchowski, A. T. (2014). “Theoretical and practical issues in eye tracker accuracy: evaluation of the low-cost Eye Tribe tracker”. *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, 8532, 433-442.
- Wang, Y., Lu, S., & Harter, D. (2021). Multi-sensor eye-tracking systems and tools for capturing Student attention and understanding engagement in learning: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21(20), 22402-22413.

## REFERENCES

- Wang, Y., Wang, L., Wang, C., & Zhao, Y. (2016). How eye movement and driving performance vary before, during, and after entering a long expressway tunnel: considering the differences of novice and experienced drivers under daytime and nighttime conditions. *SpringerPlus*, 5, 1-10.
- Wann, J. P., & Swapp, D. K. (2000). Why you should look where you are going. *Nature neuroscience*, 3(7), 647-648.
- Warren, W. H., & Fajen, B. R. (2004). Behavioral dynamics of human locomotion. *Ecological Psychology*, 16(1), 61-66.
- Watson, A. B., & Yellott, J. I. (2012). A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of vision*, 12(10), 12-12.
- Wedel, M., & Pieters, R. (2017). A review of eye-tracking research in marketing. *Review of marketing research*, 123-147.
- Wei, G., Zhang, Y., Jiang, T., & Luo, J. (2011). Increased cortical thickness in sports experts: a comparison of diving players with the controls. *PLoS One*, 6(2), e17112.
- Wells, W. C. (1811). XIX. Observations and experiments on vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (101), 378-391.
- White, C. T., Eason, R. G., & Bartlett, N. R. (1962). Latency and duration of eye movements in the horizontal plane. *JOSA*, 52(2), 210-213.
- Wilkie, R. M., Kountouriotis, G. K., Merat, N., & Wann, J. P. (2010). Using vision to control locomotion: Looking where you want to go. *Experimental brain research*, 204, 539-547.
- Williams, A. M., & Jackson, R. C. (Eds.). (2019). *Anticipation and decision making in sport*. Routledge.
- Williams, A. M., Ford, P. R., Hodges, N. J., & Ward, P. (2018). Expertise in sport: Specificity, plasticity, and adaptability in high-performance athletes.
- Woodhouse, J. M., & Campbell, F. W. (1975). The role of the pupil light reflex in aiding adaptation to the dark. *Vision research*, 15(6), 649-653.

## REFERENCES

- Wyss, C., Rosenberger, K., & Bühner, W. (2021). Student teachers' and teacher educators' professional vision: Findings from an eye tracking study. *Educational Psychology Review*, 33, 91-107.
- Xenos, M., Mallas, A., & Minas, D. (2024, March). Using Eye-Tracking for Adaptive Human-Machine Interfaces for Pilots: A Literature Review and Sample Cases. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2716, No. 1, p. 012072). IOP Publishing.
- Xia, Y., Heidari, H., Lunardi, A., & Ghannam, R. (2023). Low Cost Real-time Eye Tracking System for Motorsports. In *2022 29th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. IEEE.
- Xu, J., Min, J., & Hu, J. (2018). Real-time eye tracking for the assessment of driver fatigue. *Healthcare technology letters*, 5(2), 54-58.
- Yamada, Y., & Kobayashi, M. (2018). Detecting mental fatigue from eye-tracking data gathered while watching video: Evaluation in younger and older adults. *Artificial intelligence in medicine*, 91, 39-48.
- Yamakoshi, T., Matsumura, K., Yamakoshi, Y., Hirose, H., & Rolfe, P. (2010). Physiological measurements and analyses in motor sports: a preliminary study in racing kart athletes. *European Journal of Sport Science*, 10(6), 397-406.
- Yang, C., Liu, Z., Zhou, Q., Xie, F., & Zhou, S. (2014). Analysis on eye movement indexes based on simulated flight task. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 11th International Conference, EPCE 2014, Held as Part of HCI International 2014, Heraklion, Crete, Greece, June 22-27, 2014. Proceedings 11* (pp. 419-427). Springer International Publishing.
- Yang, Q., Bucci, M. P., & Kapoula, Z. (2002). The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 43(9), 2939-2949.
- Yarbus, A. L., & Yarbus, A. L. (1967). Eye movements during perception of complex objects. *Eye movements and vision*, 171-211.
- Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(8), 585-596.

## REFERENCES

- Yildirim, F. B., & Sarikcioglu, L. (2007). Marie Jean Pierre Flourens (1794–1867): an extraordinary scientist of his time. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78(8), 852-852.
- Young, L. R., & Sheena, D. (1975). Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 7(5), 397–429.
- Young, T. (1801). II. The Bakerian Lecture. On the mechanism of the eye. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (91), 23-88.
- Yuen, N. H., Tam, F., Churchill, N. W., Schweizer, T. A., & Graham, S. J. (2021). Driving with distraction: measuring brain activity and oculomotor behavior using fMRI and eye-tracking. *Frontiers in human neuroscience*, 15, 659040.
- Zargari Marandi, R., Madeleine, P., Omland, Ø., Vuillerme, N., & Samani, A. (2018). Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals. *Scientific reports*, 8(1), 13148.
- Zelinsky, G. J., & Sheinberg, D. L. (1997). Eye movements during parallel–serial visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(1), 244.
- Zemblys, R., Niehorster, D. C., & Holmqvist, K. (2019). gazeNet: End-to-end eye-movement event detection with deep neural networks. *Behavior research methods*, 51, 840-864.
- Zhang, A., Nowruzi, F. E., & Laganieri, R. (2021, May). Raddet: Range-azimuth-doppler based radar object detection for dynamic road users. *In 2021 18th Conference on Robots and Vision (CRV)* (pp. 95-102). IEEE.
- Zuckerman, M. (1994). Behavioral expressions and biosocial bases of sensation seeking. *Cambridge university press*.
- Życzkowski, M., Szustakowski, M., Rózanowski, K., Murawski, K., Karol, M., & Markowski, P. (2012). Research and parameter optimization of the infrared sensor for eye track. *Acta Physica Polonica A*, 122(5), 942-945.

## REFERENCES