



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2022

**Valutazione dello stress mentale e
del carico di lavoro cognitivo
attraverso i dati di eye-tracking**

Relatori:

Luca Mastrogiacomo

Riccardo Gervasi

Candidati:

Andrea Slaviero S280030

Alla mia famiglia.

Indice

1. Introduzione 1

1.1	Introduzione all'eye-tracking.....	1
1.2	L'eye-tracking e il carico cognitivo.....	3
1.3	Struttura del documento.....	6

2. Il carico cognitivo.....7

2.1	Introduzione.....	7
2.2	Definizione di carico di lavoro.....	8
2.2.1	Stress e sforzo.....	11
2.2.2	Carico di lavoro effective e ineffective.....	13
2.3	Misurare il carico cognitivo.....	14
2.3.1	Scopo delle misure.....	19
2.4	Metriche e misure per il carico cognitivo.....	21
2.4.1	Misure di tipo soggettivo.....	22
2.4.2	Misure di performance.....	29
2.4.3	Ergonomia cognitiva.....	33
2.4.4	Misure fisiologiche.....	35

3. L'eye-tracking.....37

3.1	L'eye-tracking.....	37
3.2	Basics sull'anatomia dell'occhio umano e dei suoi movimenti...42	
3.2.1	Anatomia generale dell'occhio.....	42
3.2.2	I movimenti oculari: fissazioni e saccadi.....	44
3.2.3	Altri tipi di movimenti.....	45
3.3	Dispositivi eye-tracker.....	46

3.3.1	Utilizzo dell'eye-tracking.....	48
3.3.2	Qualità delle misurazioni.....	49
3.3.3	Eye-tracking data.....	51
3.4	Misure per 'eye-tracking.....	52
3.5	Misure eye-related per quantificare il carico cognitivo.....	57
3.6	Pupillometria.....	59
3.6.1	Wavelet analysis.....	62
3.6.2	Formula unificata per la dimensione della pupilla adattata alle condizioni luminose.....	63
3.6.3	Tool per la valutazione quantitativa del carico cognitivo tramite la pupillometria.....	64
3.6.4	Un metodo per stimare il carico cognitivo tramite la dimensione pupillare, riducendo l'effetto della luce.....	68
3.6.5	Machine learning per la pupillometria..	71
3.7	Fissazioni e saccadi.....	72
3.7.1	Tassonomia degli argomenti di identificazione delle fissazioni.....	75
3.7.2	Algoritmi basati sulla velocità.....	76
3.7.3	Algoritmi basati sulla dispersione.....	80
3.7.4	Algoritmi basati sull'area.....	84
3.7.5	Comparazione tra gli algoritmi e valutazione.....	86
3.7.6	Considerazioni sugli algoritmi.....	90
3.8	Metriche ed indicatori eye-tracking per misurare il carico cognitivo.....	90
3.8.1	Metriche e indicatori della task analysis.....	91
3.8.2	Metriche e indicatori per l'eye-tracking visualization.....	92

3.8.3	Metriche e indicatori delle fissazioni.....	92
3.8.4	Metriche e indicatori per le saccadi.....	95
3.8.5	Metriche e indicatori dello scanpath.....	96
3.8.6	Metriche e indicatori per la grandezza pupillare.....	98
3.8.7	Metriche ed indicatori dei battiti delle palpebre.....	98
4.	Applicazioni dell'eye-tracking nell'ambito manifatturiero.....	100
4.1	Introduzione.....	100
4.2	Aree di applicazione.....	104
4.3	Sviluppo del prodotto.....	106
4.3.1	Indicare la percezione del prodotto da parte del consumatore.....	106
4.3.2	Analizzare il processo di design.....	108
4.4	Produzione.....	110
4.4.1	Analisi del lavoro e guida alle tasks.....	110
4.4.2	Valutare il carico cognitivo.....	113
4.4.3	Quantificare la complessità delle interfacce e delle operazioni uomo/macchina.....	115
4.4.4	Facilitare i sistemi uomo/robot.....	118
4.5	Controllo qualità.....	121
4.5.1	Trovare i patterns di controllo qualità.....	121
4.5.2	Training di controllo qualità.....	124
4.6	Logistica.....	126
4.7	Conclusioni.....	128
4.7.1	Tabelle riassuntive e statistiche.....	131
5.	Conclusioni.....	143

5.1 Considerazioni sull'utilizzo di dispositivi eye-tracking in sostituzione alle tecniche soggettive tradizionali.....	143
5.2 Idee per il futuro: eye-tracking e portable EEG in ambito manifatturiero.....	148
6. Bibliografia.....	150

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Introduzione all'eye-tracking

Quest'analisi della letteratura si pone il compito di analizzare, spiegare ed esporre come una tecnologia non così recente, ma che negli ultimi anni ha guadagnato molta importanza e rilevanza a livello scientifico, si è posta come migliore potenziale tecnologia per il futuro nell'ambito manifatturiero. La tecnologia in questione è l'eye-tracking, ossia l'utilizzo di strumenti che consentono di tracciare, e quindi di analizzare, lo sguardo ed il punto di vista di un soggetto preso in esame. In particolare, questi dispositivi sono in grado di misurare e registrare una moltitudine di parametri, come il battito delle ciglia, la grandezza pupillare e i punti esatti in cui lo sguardo viene posto. Le applicazioni sono potenzialmente infinite, dato che la vista è il mezzo tramite il quale immagazziniamo tutte le informazioni visive, ed avere una visuale soggettiva su quello che l'utente vede e sta guardando in particolare fornisce uno scorcio sui suoi pensieri e soprattutto sui processi mentali che derivano dall'input visivo. Nella figura 1 è osservabile un esempio di dispositivo eye-tracking, in particolare si tratta dei *Tobii Pro Glasses 3*.



Figure 1: ESEMPIO DI DISPOSITIVO PER L'EYE-TRACKING

Questa tecnologia viene quindi utilizzata negli ambiti della ricerca scientifica, del marketing e nell'ambito industriale e manifatturiero. Nonostante le differenze tra questi tre campi, il concetto di base è analogo: da un campione preso da una popolazione, con un determinato scopo, si riescono ad ottenere importantissimi insight su quello che è il punto di vista degli utenti. I risultati vengono quindi utilizzati per apportare miglioramenti dell'esperienza dello stesso utente, in futuro. In campo medico, ad esempio, il protocollo di dati raccolto può servire per comprendere meglio i processi mentali di una persona affetta da autismo, difficilmente accessibili in altro modo. Nel campo del marketing viene usato per capire quali sono gli elementi che catturano maggiormente l'attenzione di un potenziale consumatore, o quali sono i motivi per cui un utente sceglie un prodotto al posto di un altro. Nel campo manifatturiero, ossia quello che ha maggior importanza per la presente analisi, l'ET permette di migliorare la produttività, il training dei novizi e la sicurezza sul posto di lavoro. In che modo?

Potendo vedere quello che un operatore vede, potendo osservare la sua reazione agli stimoli, gli schemi mentali e i processi di apprendimento, si possono modificare i fattori esterni all'utente in modo da migliorare la postazione e le modalità di lavoro. Così facendo, il vantaggio è duplice, visto che sia l'azienda che l'impiegato ne beneficiano: maggior produttività e meno rischi per la prima, meno stress mentale e fatica per il secondo.

1.2 L'eye-tracking e il carico cognitivo

Nell'esecuzione di un qualsiasi tipo di compito, fisico o mentale, è presente una componente che per anni è stata trascurata, ma che ora sta prendendo sempre più importanza: il carico cognitivo. Tutti lo sperimentiamo, è soggettivo ed è strettamente correlato con l'azione che viene compiuta. Più la task è difficile, più questo aumenta. Nel punto di picco del carico cognitivo sopraggiunge lo stress mentale, e in generale un carico cognitivo e elevato porta ad una scarsa performance, ad un aumento dei rischi causato dal calo della concentrazione e ad un affaticamento maggiore e più rapido. La questione può essere efficacemente comparata con lo sforzo fisico: anche questo sopraggiunge in presenza di attività, e ad un maggiore sforzo fisico generalmente corrisponde un calo delle prestazioni. Per cui, ad un elevato sforzo, sia fisico che mentale, non corrisponde un output positivo. La differenza di base nei due tipi di sforzo sta nella complessità nel misurarli. È semplice, in effetti, capire che un oggetto è troppo pesante per essere spostato, o che trasportare oggetti di peso medio per tutta la durata di un turno lavorativo causa non pochi problemi al lavoratore in un lasso di tempo più o meno elevato. Meno intuitivo invece, è capire quale effetto comporta a livello mentale la ripetizione di compiti più o meno complessi. Infatti,

il semplice fatto di assemblare un oggetto pone la mente sotto sforzo; chiaramente lo sforzo mentale non è troppo elevato in condizioni normali, ma la situazione può essere diversa nel caso in cui la stessa task di assemblaggio venga ripetuta per un intero periodo lavorativo. Degli effetti del carico cognitivo si parlerà bene in seguito. I dispositivi di eye-tracking permettono di analizzare questo fenomeno. Esistono diverse metriche in grado di misurare degli indicatori del carico cognitivo, che vanno però adattate in base alla particolare situazione in questione. Risultati validi e affidabili possono essere estratti dagli esperimenti effettuati 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 portabili, leggeri e wireless, permettendo le misurazioni sul campo, in alcuni casi addirittura in tempo reale. Esistono altri metodi fisiologici per misurare il carico mentale, come l'elettroencefalogramma, che però hanno il problema di avere un costo elevato e soprattutto non forniscono la possibilità di misurazioni sul campo. È infatti molto importante che, in misurazioni di questo tipo, gli utenti non siano ostacolati dalla strumentazione utilizzata. Se, ad esempio, durante una task l'operatore è costretto a stare immobile, il carico mentale non sarà più solamente quello relativo all'attività, ma sarà fortemente influenzato dal fatto di dover compiere l'operazione in maniera forzatamente diversa dal solito.

È stato detto che l'eye-tracking è una misurazione fisiologica. Ciò vuol dire che le osservazioni derivano direttamente da parametri fisici misurabili. Prima di sviluppare tecnologie di questo tipo, però, il modo più comune di misurare il carico cognitivo erano le misure soggettive, in sostanza questionari individuali in

cui l'utente risponde ad una serie di domande sull'incarico assegnatogli. Misure di questo tipo sono il NASA-TLX e il Workload Profile, affrontate in dettaglio questo documento. Le misurazioni soggettive sono nate a seguito dell'esigenza di capire i processi mentali in situazioni di alto rischio o di alta importanza, non a caso

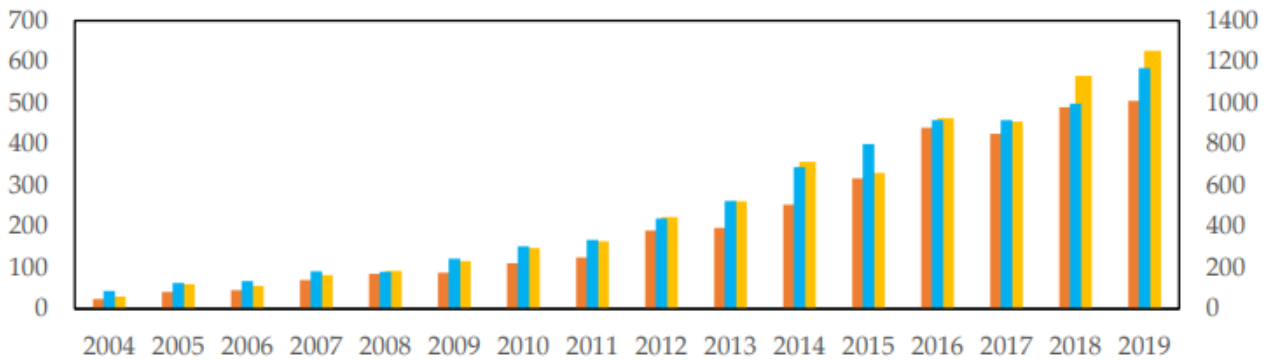


FIGURE 2: NUMERO DI DOCUMENTI REPERIBILI SUL WEB RELATIVI ALL'EYE-TRACKING

quindi trovarono la loro prima applicazione tra i piloti di aerei, dove la comprensione e l'adattamento del carico cognitivo possono fare la differenza tra la vita e la morte dell'individuo. Inoltre, nonostante possano creare risultati ambigui a causa della valutazione soggettiva su cui si basano, questi metodi vengono sempre abbinati alle misurazioni di tipo fisiologico.

La maggior parte delle pubblicazioni rappresentate nella Figura 1 rientrano nel campo della psicologia (58,13%), principalmente della psicologia sperimentale (21,72%). Tuttavia, la tecnologia di tracciamento oculare è utilizzata in un'ampia varietà di discipline, tra cui medicina e assistenza sanitaria (32,75%), neuroscienze (17,86%), matematica e informatica (13,51%), altre scienze sociali e dell'istruzione (12,94%), ingegneria e tecnologia (11,89%), linguistica (9,39%), biologia e agricoltura (6,52%), fisica e chimica (3,32%), affari e diritto (2,87%) e scienze ambientali (1,83%). Nella *Figura 2* è riportato l'andamento del numero delle pubblicazioni relative all'eye-tracking nel tempo, fino al 2019.

1.3 Struttura del documento

Nonostante l'eye-tracking sia ormai molto diffuso e i dispositivi siano economici, non esistono molte revisioni dell'utilizzo di questi dispositivi in ambito manifatturiero. Perciò è stato necessario analizzare in profondità il concetto ed estrapolare le informazioni da vari documenti; la maggior parte di questi, infatti, sono esperimenti relativi a situazioni particolari. Perciò, lo scopo di questo testo è presentare una revisione della letteratura, in modo tale da portare chiarezza in questo campo. Nonostante i documenti siano migliaia, è risultato impossibile trovare un documento che contenesse tutte le informazioni riguardante alla misurazione nel carico cognitivo tramite eye-tracking. Perciò, per la stesura, è stato adottato un approccio di tipo bottom-up.

La prima fase del documento presenta il problema affrontato, ossia quello del carico di lavoro mentale. Verranno qui spiegate le peculiarità e le caratteristiche del carico di lavoro, e in particolare del carico cognitivo. Verranno poi esposte le varie tipologie di misurazione maggiormente utilizzate, per poi portare l'attenzione sull'eye-tracking e sui vari dispositivi. Dopodiché si affronteranno tutte le metriche e i dati che gli occhiali possono registrare, spiegando le modalità e le cause dei fenomeni oculari. Si parlerà perciò di pupillometria, identificazione di fissazioni, saccadi e della frequenza dei battiti delle palpebre (blink rate). I capitoli finali riassumeranno in dei concetti tutte le informazioni esposte in precedenza, e si parlerà della possibilità di integrare la tecnologia eye-tracking con altri dispositivi simili.

Capitolo 2

Il carico cognitivo

2.1 Introduzione

Per molti anni si è parlato di carico di lavoro, e di quanto rappresenti una questione importante per la ricerca e lo sviluppo di sistemi di ogni genere. Al fine di valutare soluzioni alternative nel campo del design dei sistemi, infatti, è importante non solo valutare la performance di un sistema, ma anche il carico di lavoro dei singoli operatori. In ogni caso, al momento esistono troppe idee contrastanti per misurare il *workload* in maniera univoca. La stessa definizione di carico di lavoro è spesso ambigua, e raramente approfondita.

Il carico cognitivo, o carico di lavoro (*Workload, Mental Workload*), è in maniera semplicistica l'interazione tra l'operatore e la task assegnatagli, in presenza di operazioni ripetitive (Jahns, 1977). L'MWL è una misura molto importante, perché crea awareness sul cambiamento delle performance (positivo o negativo che sia) all'aumentare della richiesta cognitiva dettata dalle tasks. Per portare a termine una task o un gruppo di tasks è quasi sempre necessaria l'unione di performance fisiche e mentali. Non sempre sono presenti entrambi gli aspetti nello svolgimento di un compito, ma è raro che non sia così. Inoltre, come è universalmente riconosciuto e approvato che lo sforzo fisico sia reale e quantificabile, lo stesso si può dire dello sforzo mentale, anche se l'attenzione che vi si pone è relativamente recente.

Il *Mental Workload*, quindi, descrive la domanda cognitiva che una task o un insieme di tasks richiedono, sfruttando come risorsa interna la limitata capacità processuale del cervello umano, in maniera comparabile ad uno sforzo fisico. Notare bene che per "limitata" si intende non infinita. La mente umana infatti, così come i computer, ha dei limiti strutturali che ne definiscono la capacità (Jahns, 1977).

2.2 Definizione di carico di lavoro

Un chiaro e utile concetto per la definizione di carico di lavoro è stato proposto da Jahns (*A Concept of Operator Workload in Manual Vehicle Operations*, 1973). Nel suo trattato, divide la vasta area rappresentata dal carico di lavoro dell'operatore in tre sottogruppi:

- Carico di lavoro in input
- *Effort* dell'operatore
- Performance (o risultato del lavoro svolto)

Il carico di lavoro in input comprende eventi o fattori esterni e non controllabili direttamente da parte dell'operatore, mentre l'*effort* è interno all'operatore umano. Spesso, in questo campo, i termini sforzo e stress acquisiscono la stessa accezione semantica. Comunque, è più frequente utilizzare il secondo termine quando si verificano i picchi di carico cognitivo.

La performance è generalmente classificata come l'insieme di dati utili generati come output del lavoro svolto dall'operatore. Questi dati servono come input per altri componenti del sistema uomo-macchina-ambiente caratteristico di tutte le

aziende moderne. Importanti sono anche i feedback che l'operatore rilascia dopo lo svolgimento delle tasks.

Le maggiori fonti di carico in input possono essere separate in tre classi principali:

- Ambientali: rumori, vibrazioni e temperatura, che si vanno ad unire a tutti quegli stimoli caratteristici del mondo esterno, difficilmente controllabili.
- Indotte dal design o dalla situazione: caratteristiche dei display e dei dispositivi utilizzati, layout della zona lavorativa, dinamica dei macchinari. In generale, tutto quello che compone lo "scheletro" fisico su cui si basano le tasks da svolgere.
- Procedurali: briefing e istruzioni, sequenza dei compiti da svolgere, e durata prevista. Il sistema organizzativo che caratterizza un compito.

Lo sforzo dell'operatore dipende da più fattori, che includono il carico e in input e i requisiti di performance della task assegnata. Riassumendo tutto ciò nella funzione 1.0:

$$\text{Effort} = f(\text{carico, stato dell'operatore, criteri di performance interni}) \quad (1.0)$$

Lo stato dell'operatore dipende da molti fattori: quelli relativamente stabili come caratteristiche psicofisiche, background generale e personalità e quelli fluttuanti come esperienza, motivazione e attenzione (Moray, 1979).

I criteri di prestazione interni sono mantenuti dall'operatore umano e influenzano il suo livello di errore tollerato. Dipendono da fattori dello stato dell'operatore (ad esempio, motivazione), dai requisiti di performance che vengono richiesti, e dalle istruzioni assegnate. Non tutte queste relazioni funzionali sono chiaramente definite o misurabili in situazioni di carico di lavoro mentale rispetto al carico di lavoro fisico.

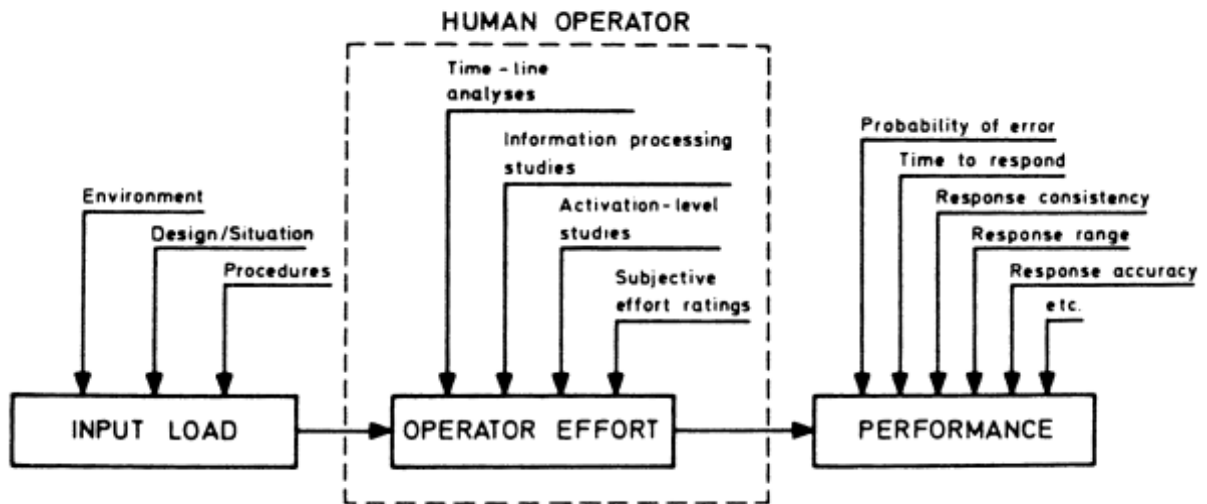


Figure 3:Attributi del carico di lavoro dell'operatore

Mentre l'operatore può essere in grado di mostrare gli stessi livelli di performance in sistemi con design differenti ma con scopi analoghi, è comunque assolutamente necessario misurare l'effort speso in ciascuna situazione, benché il risultato sia lo stesso. Infatti, un risultato, in maniera generale, non rispecchia lo sforzo espresso per raggiungerlo. Basti pensare ad un atleta che corre una gara di corsa: fissare un determinato tempo per lui potrebbe non rappresentare un problema; ma per un atleta meno performante, ottenere lo stesso risultato potrebbe voler dire dare il 100% delle proprie possibilità. La stessa cosa accade sul luogo di lavoro, con la differenza che i fattori che influenzano le performance sono diversi. In *figura 3* possiamo vedere, in versione schematizzata, il rapporto che c'è tra l'operatore umano e il suo *effort*, il carico in input e la performance che ne deriva.

Lo studio dell'aspetto mentale del lavoro è molto importante quindi, visto che consente di estrapolare dati da situazioni reali, per poi applicarli al fine di modificare e migliorare il sistema che li ha generati. La filosofia è quella del minimo costo e sforzo, col massimo risultato. Tecnologie come l'eye-tracking (ET) sono state fondamentali per la costruzione di questo tipo di approccio, e perciò

proprio questo metodo di studio verrà approfondito con grande attenzione all'interno di questo documento.

2.2.1 Stress e sforzo

Lo stress e lo sforzo dovrebbero indicare gli effetti del lavoro sull'essere umano, e sembra esserci una connessione tra l'affaticamento corpo umano nel lavoro manuale e la fisiologia con le attività mentali (Rohmert, 1971). Con il termine carico, comunque, il concetto diventa più ambiguo in questo contesto. Il carico cognitivo ha degli effetti sulla forma mentale di una persona in termini di risorse che questa rende disponibili. La relazione tra mente e corpo in questo contesto è comunque fonte di dibattito. Non è comunque una funzione monotona: se il carico cognitivo aumenta le risorse disponibili, chiamiamo questo effetto motivazione; se invece accade l'opposto si parla di stress. Le variabili fisiologiche

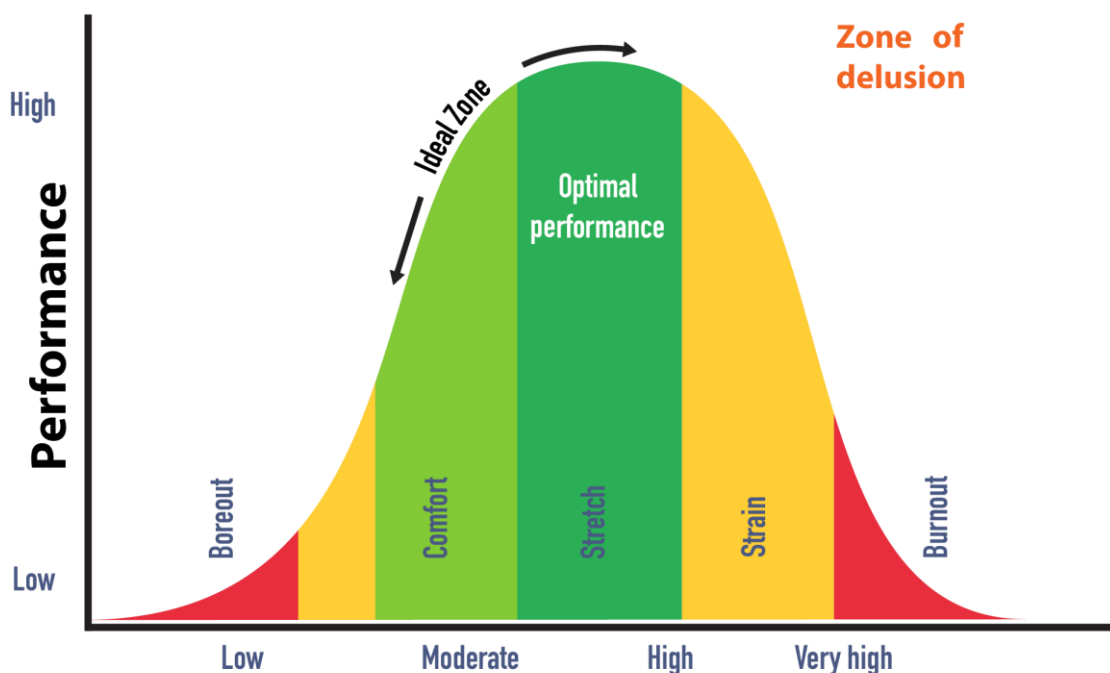


FIGURA 3.1: ANDAMENTO DELLA PERFORMANCE IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE A CUI È SOTTOPOSTO L'OPERATORE

cambiano con l'attività mentale e la calibrazione delle misure non è tipicamente stabile nel tempo. (Wisner, 1971). Le misure fisiologiche sembrano essere, insieme alle misure soggettive, i migliori indicatori del carico cognitivo. Si è parlato delle misure fisiologiche in generale in precedenza, e in seguito verrà approfondita la parte legata appunto alla vista e al funzionamento dell'occhio umano, approfondendo il legame presente tra l'apparato visivo e lo stress mentale.

Perciò, come si evince dalla *figura 3.1*, per una performance di lavoro ottimale è necessaria la giusta pressione lavorativa, che può essere presente sotto forma di deadlines temporali, oppure di difficoltà di esecuzione. Una bassa pressione porta a risultati scadenti, in quanto l'operatore rischia di cadere nella noia, non essendo motivato a raggiungere degli obiettivi reali. Se però il carico di lavoro aumenta a tale punto da superare la soglia di sopportazione, la motivazione diventa stress (strain), e in casi estremi si entra in una zona chiamata di burnout, in cui il soggetto è incapaciato a lavorare a causa dell'esposizione ad un carico per lui esagerato.

2.2.2 Carico di lavoro *effective* e *ineffective*

Il carico cognitivo può essere diviso in due parti: effettivo ed ineffettivo. il carico di lavoro effettivo (ad esempio il carico di lavoro richiesto da una task) è la quantità minima di carico di lavoro prodotta dai requisiti della task. Questo segmento del carico è la parte di sforzo che si occupa di compiere il lavoro in maniera diretta. Dall'altra parte, il carico di lavoro ineffective è la parte di carico che potrebbe essere evitata dai lavoratori perché non contribuisce direttamente al completamento della task. Questo tipo di carico può essere ridotto con

l'apprendimento e l'allenamento; è questo, infatti, il fine ultimo degli studi sul carico cognitivo, ossia rendere il lavoro da svolgere più agevole all'operatore e più profittevole per l'azienda. Relativamente alle strategie di esecuzione delle task il carico effettivo si correla ad azioni veloci ed accurate, mentre il carico *ineffective* è associato con errori e inaccuratezza. *L'effective workload* ha bisogno di minore attenzione perché è collegato all'efficienza, è invece necessaria più attenzione alla parte *ineffective* del MWL, al fine di controllare ogni tappa del processamento delle informazioni.

Il riconoscimento del *mental workload* è un importante aspetto nel design e nelle valutazioni che vertono sullo sviluppo e sulla progettazione di ogni singola task occupazionale (Rohmer, 1972). L'interazione tra l'operatore e la task a lui assegnata è una misura importante, perché fornisce consapevolezza su dove sia possibile aumentare la richiesta di una task, e dove invece questa azione porterebbe a un impatto negativo sulla performance umana. Inoltre, il carico di lavoro aumenta quando con l'aumentare della difficoltà della task, o quando il tempo allocato per il completamento della stessa attività diminuisce. Regolare la domanda delle task, in modo tale che l'operatore non sia né sovraccaricato, né con livelli troppo bassi di carico, porta ad un miglioramento della sicurezza, della salute, del comfort e della produttività a lungo termine. L'ultimo aspetto è fondamentale al fine di creare degli asset a livello di risorse umane che stiano di valore. Infatti, come ci si può aspettare, lunghi periodi ad alto carico cognitivo possono portare a processi non efficienti, performance scadenti e addirittura avere un impatto sulla salute mentale del lavoratore. Si può dire quindi che il carico mentale ha degli effetti diretti sulle abilità di un operatore di sostenere o raggiungere determinati livelli di performance.

Come citato da Jung e Jung (2001), il concetto di carico di lavoro mentale è associato con la differenza tra la quantità di risorse disponibili all'interno di una persona, e le risorse richieste per una determinata task che deve svolgere. Il carico cognitivo può essere perciò alterato cambiando il numero di risorse disponibili che la persona può offrire, oppure riducendo la richiesta delle tasks. Le misure del MWL sono usate al fine di ottimizzare questi processi.

2.3 Misurare il carico cognitivo

Le misure del carico di lavoro vanno differenziate tra misure del carico in input e misure dell'*effort*, in associazione con la definizione di *workload* (Lindblom & Thorvald, 2014).

Le misure di input includono la descrizione dell'ambiente lavorativo, delle procedure del design e delle variabili situazionali. Sono predeterminate oppure costruite appositamente in base al contesto; il loro uso e la loro costituzione dipendono dalla situazione ambientale immediata, dal design dei sistemi uomo-macchina e dalle loro caratteristiche, e infine dalle politiche operative del sistema utente. Una variabile di carico può essere, ad esempio, il numero di aerei controllati da un operatore di una torre di controllo. È interessante, inoltre, come molte fonti siano strettamente correlate al modo dell'aviazione. La spiegazione di questo fenomeno risiede nel fatto che i primi contesti in cui si è dato peso agli aspetti psicologici nel completare una task sono proprio legati al mondo aeronautico militare, derivati dal bisogno di quantificare lo sforzo cognitivo di operatori addetti a compiti che necessitano di estrema precisione e concentrazione. Infatti, come vedremo, uno dei primi (e tra i più validi ancora oggi) metodi per la misurazione del carico cognitivo è il NASA-TLX, sviluppato

appunto dalla Nasa in collaborazione con il dipartimento militare aeronautico statunitense (Johansen, 1976).

Le misure dell'effort dell'operatore sono quindi di grande importanza e oggetto di studio. Tali misure possono essere generalizzate come misure del carico di lavoro. Ogni tecnica sviluppata al fine di valutare e misurare lo sforzo può essere classificata in quattro gruppi di base:

- Analisi time-line:

Il tempo di esecuzione di ogni particolare elemento di una task è considerato, così come il tempo complessivo necessario per svolgere tale task. Margini di tempo più o meno stretti o pressioni temporali definiscono diversi livelli di sforzo dell'operatore.

- Studi sul processamento delle informazioni:

L'operatore viene considerato come processore di informazioni con capacità di elaborazione limitata. In alcuni casi, delle tasks secondarie vengono strutturate appositamente per lo studio che si vuole svolgere, e vengono quindi utilizzate per misurare la capacità cognitiva di riserva dell'operatore. Ciò significa che il relativo decremento delle performance nelle attività secondarie e accessorie fornisce importanti informazioni sul livello di sforzo aggiuntivo che l'operatore potrebbe spendere nella task principale, al posto di utilizzare le proprie risorse nell'attività secondaria.

Le tasks secondarie possono essere aritmetiche, di tocco, di reattività di scelta, di *critical tracking* e operazioni di carico inter-attive.

Misure teoriche di controllo dello sforzo dell'operatore sono basate sulla linea temporale, sulla frequenza delle misurazioni e su modelli di controllo.

Funzioni di ampiezza e di densità spettrale costruite sull'output dell'operatore possono essere viste come indicatori dello sforzo speso.

L'effort index è calcolato come il rapporto tra P e P_0 , dove P e P_0 sono rapporti reciproci segnale-rumore del rumore di osservazione. P indica la capacità di carico massima dell'operatore, e P_0 indica il carico cognitivo a riposo, ossia misurato quando non vengono svolte tasks. L'effort index consente il calcolo dell'allocazione dell'attenzione tra differenti fonti di informazione (Moray, 1971).

- Studi sul livello di attivazione dell'operatore:

Sono basati sull'ipotesi che il livello di attivazione psicologica dell'operatore umano dipenda dallo sforzo che questi applica per portare a termine un compito. L'aritmia sinusoidale del cuore è, ad esempio, viene utilizzata da alcuni ricercatori come indicatore dell'effort mentale. Un'altra misura utilizzata è invece la pupillometria, che verrà analizzata più avanti in questo articolo.

- Ratings soggettivi dell'*effort*:

È un'utile tecnica di misurazione dello sforzo compiuto. Ha delle limitazioni, essendo basata su misurazioni soggettive, e possono essere tratte solo conclusioni di carattere generale. Sono composte principalmente da ratings che l'operatore compila, che poi vengono studiati e analizzati. È molto importante istruire i partecipanti agli esperimenti in maniera adeguata, per cercare di ridurre il più possibile i bias dell'operatore.

Le misurazioni soggettive non garantiscono un'accuratezza del 100%, ma sono la base su cui vengono costruiti molti studi riguardanti il carico cognitivo.

Le quattro classi di tecniche di misurazione dello sforzo differiscono principalmente sul tipo di aspetto dello sforzo che analizzano. Le analisi delle timeline sono orientate al carico; gli studi sul processamento delle informazioni sono orientate alle performance; gli studi sul livello di attivazione dell'operatore sono orientate allo stato dell'operatore; infine, i rating soggettivi dell'effort analizzano esclusivamente gli aspetti coscienti dello sforzo. Ne segue che ogni tecnica può analizzare solamente una piccola porzione dell'area che comprende

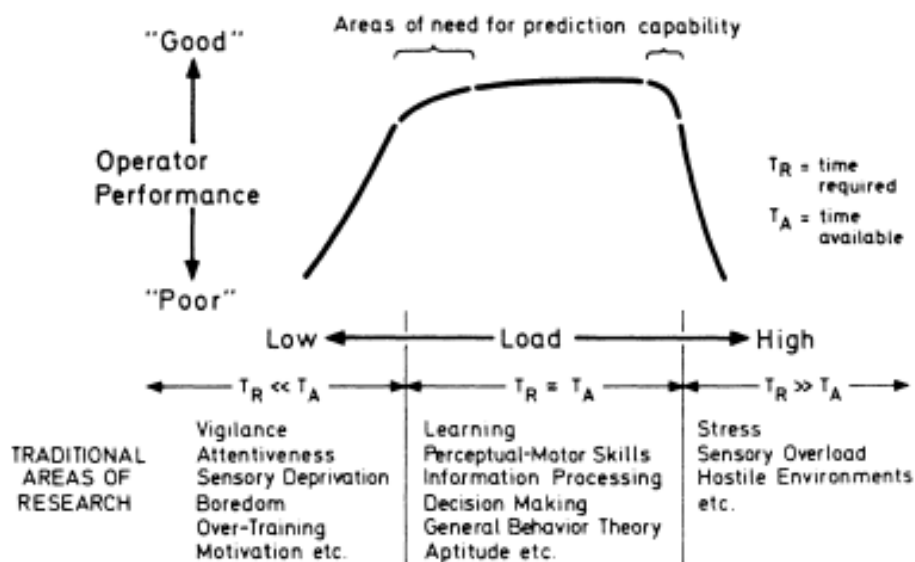


FIGURE 4: RELAZIONE IPOTETICA TRA LA PERFORMANCE DELL'OPERATORE E IL CARICO IN INPUT DURANTE OPERAZIONI DI MULTITASKING

diversi aspetti del carico di lavoro dell'operatore. Questo problema accomuna tutte le misure, visto che non ne esiste una che può essere definita completa.

Se consideriamo sistemi uomo-macchina reali, le situazioni di multitasking sono le uniche situazioni possibili. In questi casi, le relazioni tra la performance dell'operatore e il carico in input sono ipoteticamente quelle espresse dalla figura 4. Tre "regioni" di carico sono distinte in base a considerazioni temporali. A ciascuna di queste tre aree sono associate molteplici aree di ricerca tradizionali.

Per stabilire il valore relativo dei diversi tipi di misure del carico di lavoro, è necessario distinguere tra differenti fattori di carico e diverse tipologie di effort. Queste sono le basi per creare una combinazione di misure singole differenti, al fine di riuscire a creare un database il più affidabile e completo possibile.

La *figura 4* rappresenta uno schema semplificato del meccanismo di processamento delle informazioni dell'essere umano. Le diverse tipologie dell'effort dell'operatore si presentano in base alle specifiche combinazioni dei fattori di carico che si ritrovano nelle situazioni di multitasking. Ognuno di questi tipi di sforzo è relativo alle differenti funzioni di elaborazione delle informazioni del cervello umano, come illustrato in figura. Esempi possono essere lo *scanning effort*, lo sforzo percettivo, di elaborazione, decisionale, memonico, comunicativo. In aggiunta a questi elementi, spesso vengono considerate anche le condizioni emotive dell'operatore, che ad esempio possono condizionare le situazioni di *peak-load* in maniera non indifferente.

Diverse misure si associano quindi a diverse tipologie di sforzo. Un approccio intelligente al problema della misurazione del *MWL* in situazioni reali è quello di effettuare un'analisi timeline, che calcola la percentuale del carico di lavoro a cui l'operatore viene sottoposto facendo il rapporto tra carico speso e carico disponibile. Si può estendere questo concetto a tutte le altre misure citate in precedenza, trasformandole in percentuali di occupazione dei diversi canali. In aggiunta a questo tipo di integrazione delle analisi timeline, le misure del livello di attivazione dell'operatore vanno prese in considerazione per capire quello che succede nel momento di picco del WL, dove i fattori emozionali e le possibili situazioni conflittuali vanno controllate.

I ratings soggettivi dovrebbero essere usati in ogni caso, in quanto spesso sono i più affidabili tra le misure generali (Bommer e Fendley, 2015). La *figura 5* mostra un insight del funzionamento del cervello quando viene sottoposto ad un carico.

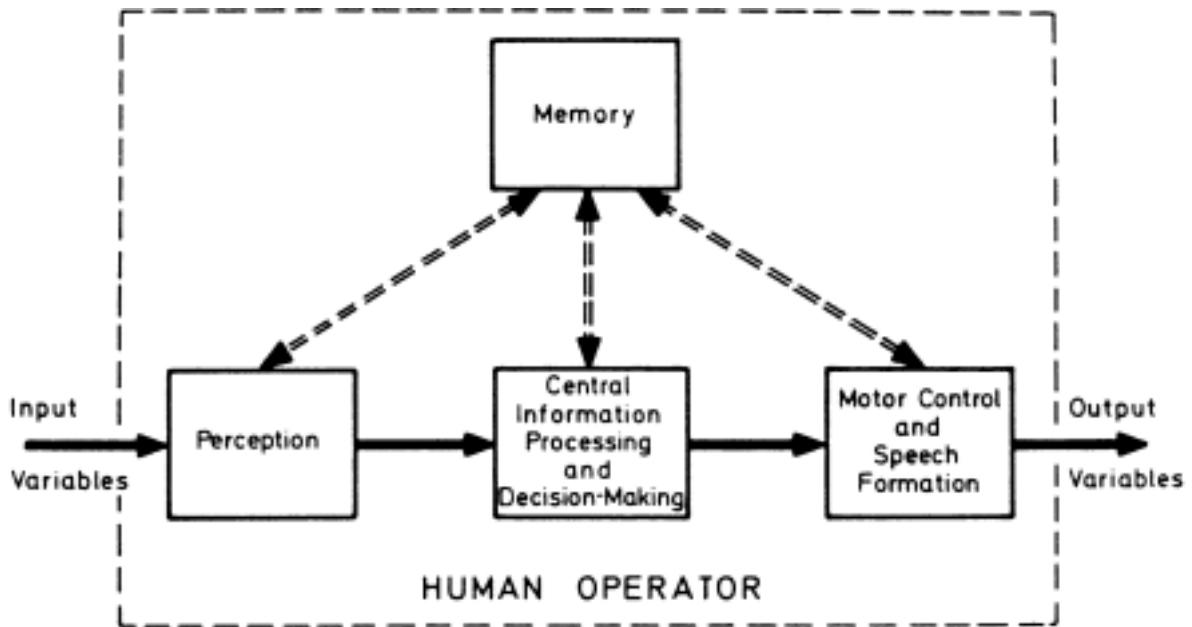


FIGURE 5: MECCANISMO DI ELABORAZIONE DELLE INFORMAZIONI NEL CERVELLO UMANO

2.3.1 Scopo delle misure

Il bisogno di teorie e strategie di misurazioni del carico cognitivo ha origine nel numero crescente di attività in cui l'operatore, al posto di eseguire delle operazioni meccaniche, deve svolgere compiti di monitoraggio, supervisione, organizzazione e di problem solving. I sistemi sono sempre più automatizzati, e l'allocazione delle risorse e del personale è oggetto di grande preoccupazione. È perciò necessario rispondere alle domande "quanto può fare una persona?" oppure "quanto sforzo richiede questo lavoro?"

Il concetto di *workload* è un costrutto che può essere generato solo dalla misurazione delle performance, e molti sforzi per definire la teoria o le strategie di misurazione derivano dalla concezione dell'essere umano come un sistema

monocanale a capacità limitata. L'asserzione sulla capacità limitata è generalmente accettata ma è elusiva, visto che gli indici di sforzo applicato a una task in particolare non sono abbastanza esaustivi da definire bene il carico impegnativo. Inoltre, non esistono metriche universali con le quali comparare la richiesta delle tasks all'interno del range delle attività interessate. I ricercatori si stanno perciò muovendo oltre la considerazione che vede l'essere umano come sistema ad un unico canale, e si pone maggiore attenzione alla natura delle singole attività, correlatamente alla connessione che ci sono tra le stesse. Infatti, l'evoluzione della teoria dell'uomo mono-canale asserisce che più task possono essere effettuate insieme, in funzione della loro natura e delle condizioni sotto le quali sono svolte.

Anche se predire il carico di lavoro è importante, lo sviluppo di misure che permettono il monitoraggio del workload senza influire sull'esecuzione delle task è molto importante. L'ingresso di tecnologie come l'eye-tracking risponde in maniera egregia a questa necessità. Infine, mentre si guarda avanti in un punto nel futuro dove sia possibile settare standard che consentono di avere un carico di lavoro accettabile in diversi impieghi pratici, c'è anche la necessità di sviluppare criteri analoghi alla limitazione delle ore di lavoro per le attività industriali è alle soglie di rumorosità negli ambienti di lavoro.

2.4 Metriche e misure per il carico cognitivo

Lindblom & Thorvald (2014) si pongono la questione di come la comprensione nel carico cognitivo all'interno di un contesto manifatturiero possa portare a un luogo migliore di lavoro per gli operatori. Nel loro studio, presentano lo sviluppo iniziale di uno strumento per quantificare il carico cognitivo durante operazioni manifatturiere.

Lo scopo di questo strumento è identificare i rischi e i punti forti delle tasks e dei design delle postazioni di lavoro, in quei casi in cui un alto carico cognitivo può portare a scarse performances. Lo strumento valuta le attività e le funzioni della stazione di lavoro; è composto da un form di valutazione che presenta un totale di 12 fattori che influenzano gli aspetti del lavoro.

I fattori che si basano sulle attività sono la saturazione, la dimensione del lotto e la sua varianza, il livello di difficoltà, la difficoltà di utilizzo degli strumenti e infine il livello di attenzione richiesta. Dall'altra parte, i fattori basati sulla workstation sono il numero di strumenti usati, il mapping della sequenza di assemblaggio determinata dalla stazione di lavoro, l'identificazione delle parti, la qualità delle istruzioni, il costo delle informazioni ed i limiti posti. Ad ogni fattore viene quindi fornita una valutazione, e il punteggio combinato fornisce importanti indicazioni sullo sforzo cognitivo che l'operatore mette in atto.

Layer, Karwoski & Furr (2009) hanno condotto un esperimento per testare la seguente ipotesi: la performance umana in operazioni manifatturiere è strettamente correlata con la domanda cognitiva richiesta all'operatore e la qualità del lavoro inserita nel contesto quotidiano, di cui fa parte anche ciò che succede al di fuori dell'azienda.

L'esperimento è stato condotto sul campo servendosi di due imprese appartenenti rispettivamente al settore dell'assemblaggio e della fabbricazione. Da questo importante lavoro, un modello è stato sviluppato al fine appunto di comprendere il funzionamento della performance umana, che è stata posta come variabile dipendente; le variabili indipendenti invece sono la domanda cognitiva e la qualità del lavoro. Quest'ultima venne misurata tramite la qualità della produzione (numero di difetti di qualità) e la percentuale di lavoro svolto

rispetto a quello programmato (% di tasks completate). L'altra variabile indipendente viene intesa come indice di complessità delle tasks, di adattabilità dell'operatore e motivazione; queste misure sono state ottenute tramite un'analisi cognitiva delle tasks. La qualità della vita lavorativa è stata misurata usando un questionario per definire le variabili di supervisione, soddisfazione e considerazioni sull'apprendimento. I risultati di questo lavoro confermarono che la performance umana dipende carico cognitivo che il compito richiede, associato alla percezione della qualità della vita lavorativa da parte dell'operatore. Comunque, non è stata individuata una correlazione significativa tra la domanda cognitiva e la qualità del lavoro.

2.4.1 Misure di tipo soggettivo

Le misure di tipo soggettivo chiedono direttamente all'operatore di fornire un giudizio sullo sforzo cognitivo sperimentato durante l'esecuzione di determinate tasks. Questo tipo di strumenti sono relativamente poco intrusivi, facili da implementare e hanno guadagnato un significativo supporto teorico, principalmente per la facoltà di creare dati e informazioni sensibili sul livello di carico del lavoratore. Secondo sempre Bommer e Fendley (2015) le misure soggettive sono state utilizzate largamente nel corso della storia recente, perché anche se non si basano su dati e oggettivi, sono misure valide e affidabili nel complesso.

Ci sono diversi strumenti che permettono di effettuare misurazioni soggettive, di seguito verranno elencati i metodi principali.

National Aeronautics And Space Administration – Task Load Index (NASA-TLX)

Il NASA-TLX è uno strumento di valutazione soggettiva del carico di lavoro; è lo strumento di questo tipo più utilizzato in assoluto. Ha la sua origine nel campo dell'areazione civile e militare statunitense (essendo appunto realizzato dalla nasa), ma ha trovato applicazioni in molti altri domini, come il nucleare, l'automobilismo e nel settore manifatturiero. Viene usato come benchmark in base al quale le nuove misure di valutazione del MWL vengono testate e valutate.

Passando all'aspetto tecnico del metodo, il NASA-TLX utilizza una scala multidimensionale per misurare la performance di un operatore nello svolgimento di una task. Questa scala è composta da sei sotto-scale, che sono le seguenti:

1. Domanda mentale – misura se l'attività percettiva sia facile o complessa
2. Domanda fisica – misura se l'attività fisica svolta durante il compito sia stremante oppure rilassante
3. Domanda temporale – misura la quantità di pressione avvertita dall'operatore in relazione al ritmo di esecuzione richiesto dall'attività
4. Effort- misura la difficoltà del lavoro svolto al fine di completare la task
5. Performance – misura la soddisfazione del soggetto relativamente all'esecuzione della task
6. Livelli di frustrazione – misura l'umore del soggetto nell'esecuzione del compito

TABELLA 1: QUESTIONARIO DEL NASA-TLX

Oggetto	Valutazione	Descrizione
Domanda mentale	1-10 Basso/Alto	Quanta attività percettiva e mentale è stata richiesta (pensare, decidere, calcolare, ricordare, guardare, cercare ecc)? La task è stata facile o ha richiesto molto impegno?
Domanda fisica	1-10 Basso/Alto	Quanta attività fisica è stata richiesta (spingere, tirare, ruotare ecc.)? la task è stata facile o esigente a livello fisico, semplice o complessa?
Domanda temporale	1-10 Basso/Alto	Quanta pressione temporale è stata avvertita a causa del ritmo o della velocità richiesti dalla task? Il ritmo è stato lento e gestibile oppure rapido e frenetico?
Performance	1-10 Buona/Pessima	Pensi di essere riuscito a raggiungere tutti gli obiettivi richiesti dalla task? Quanto sei soddisfatto della tua performance?
Effort	1-10 Basso/Alto	Quanto hai dovuto lavorare duro (mentalmente e fisicamente) per raggiungere il tuo livello di performance?
Livello di frustrazione	1-10 Basso/Alto	Quanto insicuro, scoraggiato, irritato, stressato e infastidito ti sei sentito, rispetto a quanto ti sei sentito gratificato, contento, rilassato e compiaciuto durante la task?

Ci sono poi sette steps per implementare il NASA-TLX, che sono elencati in figura 2.1

1. Definizione dell'attività soggetta ad analisi
2. Hierarchical Task Analysis (HTA) per definire e comprendere al meglio i passaggi caratteristici di ogni task (l'HTA verrà spiegata poi nel dettaglio nei paragrafi seguenti)
3. I partecipanti sono scelti in maniera tale da andare incontro ai bisogni del design sperimentale
4. Briefing per spiegare ai partecipanti il NASA-TLX e lo scopo dello studio a cui stanno partecipando
5. Svolgimento della task
6. Messa in atto del NASA-TLX vero e proprio. Sono sottoposte 15 combinazioni a coppie ai partecipanti, che devono selezionare tra le alternative quelle che hanno avuto più effetto, secondo loro, sul loro carico cognitivo espresso durante l'esecuzione della task. Viene poi sottoposto il questionario di valutazione con i sei step presentati in precedenza. Il test è presentato in *tabella 1*.
7. L'ultimo step riguarda l'elaborazione e l'analisi dei risultati ottenuti.

La modifica più comune al NASA-TLX consiste nell'eliminare la parte relativa ai confronti a coppia, dando origine a quello che viene chiamato RAW NASA-TLX.

In *figura 6* viene schematizzato il processo.

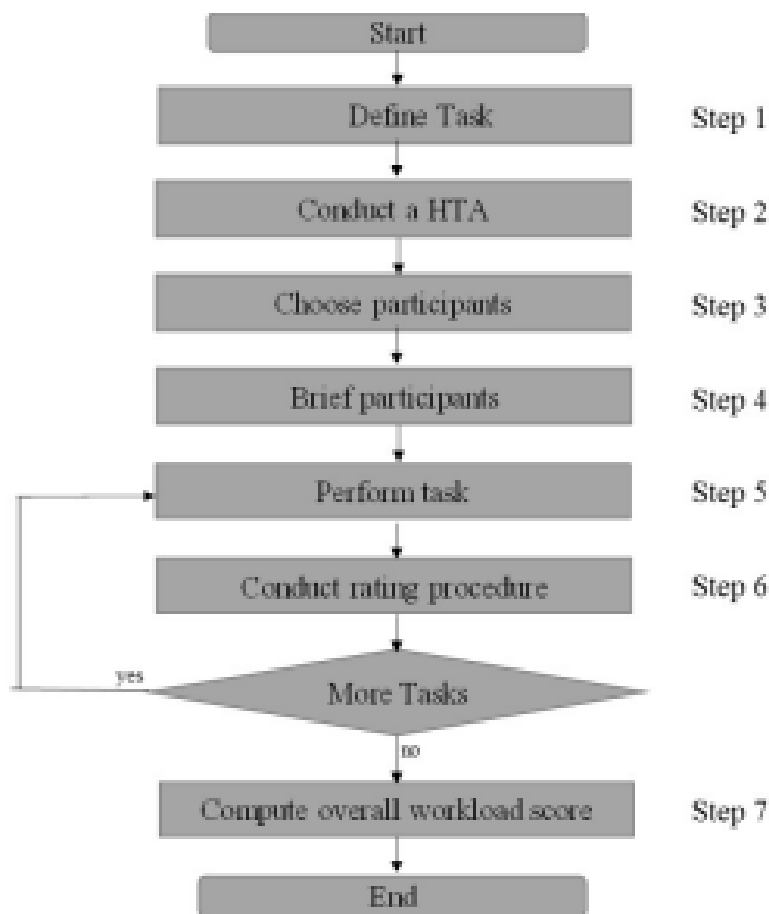


FIGURE 6: STEP PROCEDURALI DEL NASA-TLX

Workload profile

Il workload profile è uno strumento di misurazione soggettiva multidimensionale, basato sul modello delle risorse multiple proposto da Wickens nel 1987. Questo metodo di valutazione utilizza 8 dimensioni per collezionare dati sulla domanda cognitiva che le tasks richiedono: elaborazione percettiva/centrale, esecuzione della risposta selettiva, elaborazione spaziale, visuale, verbale e uditivo, output manuali e discorsivi. Questo metodo fornisce quindi un rating complessivo per ogni task, in concomitanza con una valutazione per ogni dimensione del carico di lavoro. Questi ratings multidimensionali dovrebbero riuscire a spiegare in

maniera adeguata l'ammontare del MWL, al fine di categorizzare la maniera attraverso la quale la task richiede uno sforzo.

La *figura 7* evidenzia i 9 steps che caratterizzano questo metodo, come citato da Stanton e associati nel 2010:

1. Specificare la task o lo scenario sotto analisi
2. HTA al fine di capire al meglio il processo che caratterizza la task.
3. Creazione di un *workload* pro forma, che consiste nella lista delle attività della task, in ordine casuale e in colonna, mentre le altre colonne della tabella che si deve creare sono composte dalle diverse dimensioni dell'MRT, ossia:
 - a. Stato di elaborazione (percettuale/centrale vs risposta)
 - b. Modalità di input (visuale vs. auditorio)
 - c. Modalità di output (manuale vs. vocale)
 - d. Codice di processamento (verbale vs. spaziale)
4. Scelta dei partecipanti
5. I partecipanti partecipano a un briefing, nel quale gli viene esposto il metodo e lo scopo dell'esperimento a cui devono partecipare. È raccomandabile che i partecipanti ricevano, precedentemente allo studio, un workshop sul MWL, sul suo riconoscimento, sulla teoria delle risorse multiple e sulle dimensioni che caratterizzano il workload profile., al fine di capire al meglio il processo. Questo tipo di attenzioni è importante poiché le azioni degli operatori e le loro conclusioni sono alla base della validità delle misurazioni.

6. Run pilota dell'esperimento con una task fittizia, al fine di testare il procedimento e mostrare ai partecipanti i criteri con cui va compilato il profilo pro-forma.

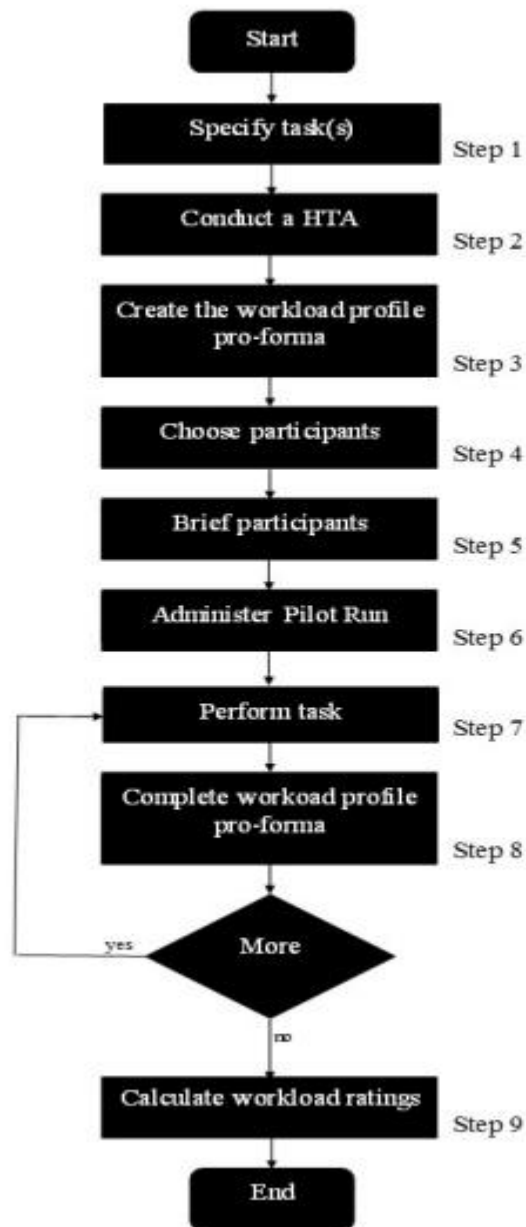


FIGURE 7: STEP PROCEDURALI DEL *WORKLOAD PROFILE*

7. Esecuzione della task sotto analisi.
8. Compilazione completa del profilo pro-forma creato in precedenza. I partecipanti assegnano un rating compreso tra 0 e 1 per ognuna delle dimensioni del MWL ipotizzate dal modello di Wickens.

9. L'analista è responsabile di estrapolare il workload complessivo di ogni task, analizzando e i dati raccolti.

2.4.2 Misure di performance

Quando si considera la performance nel campo delle operazioni di movimento ripetitive, tre fattori vanno presi in considerazione: l'effetto della cognizione inconscia, l'effetto learning e le misurazioni effettuate

La cognizione inconscia

Nelle operazioni ripetitive si verifica, nella grandissima maggioranza dei casi, un effetto di apprendimento. È un fenomeno naturale, grazie al quale l'output dell'operatore migliora, insieme ai suoi livelli di produttività. Come un operatore diventa più efficiente nel processo sul lungo termine, e l'effetto learning si riduce, si può andare incontro al fenomeno della cognizione inconscia. Quest'ultima è il processo mentale che, operando al di fuori della consapevolezza di chi lo sperimenta, influenza comunque le esperienze cosce, i pensieri e le azioni.

Un esempio di cognizione inconscia può essere quello che si sperimenta alla guida di un'automobile. Le azioni che vengono svolte durante quest'attività, che sono apparentemente prive di un grande sforzo mentale e che vengono svolte senza prestare completa attenzione ai movimenti e alle azioni che si compiono, sono considerate da alcuni studiosi come svolte inconsciamente. La cognizione inconscia dovrebbe avere, però, un effetto minimo sulla performance dell'operatore, siccome pause programmate, guasti all'equipaggiamento e interruzioni in generale hanno sempre luogo nell'ambito delle operazioni ripetitive, come nel caso delle linee di assemblaggio.

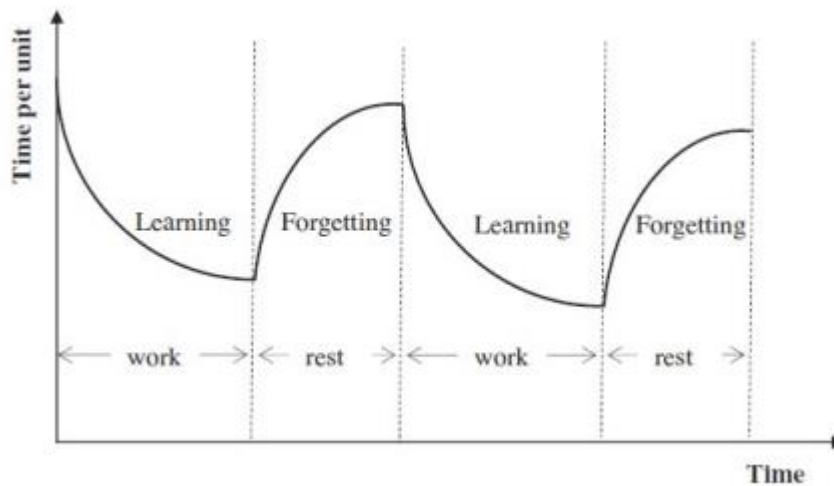


FIGURE 8: FENOMENO DELLA COGNIZIONE INCONSCIA

Durante queste pause, il fenomeno della dimenticanza ha luogo a vari livelli, in maniera dipendente dalla lunghezza dello stop lavorativo. Dopo ogni interruzione, al primo ciclo, il learning ricomincia e questo fenomeno nega, perciò, la completezza e la perpetuità della cognizione inconscia. Il fenomeno è rappresentato dalla *figura 8*. Comunque, secondo Reinhard, Greifeneder and Scharmach (2013), i processi inconsci hanno presumibilmente capacità processiva maggiore rispetto al pensiero cosciente; come risultato di questo stato incosciente, un operatore dovrebbe essere in grado di saltare delle fasi di decision making complesse, che vengono scelte in "automatico".

Learning

L'apprendimento si riferisce al miglioramento dell'efficienza operativa e alla riduzione dei costi ottenuta dalla ripetizione delle tasks nel tempo. I lavoratori imparano e migliorano le loro performance mano a mano che diventano degli esperti nel operare tale attività. Le conseguenze del learning effect comprendono livelli di output migliorati e conseguente decremento del costo unitario di produzione, oltre ad aumento della fiducia verso l'azienda e qualità del prodotto. Anche in questo caso, l'effetto learning può essere ridotto da fenomeni di dimenticanza a causa di interruzioni del lavoro.

L'oblio è il risultato delle interruzioni del lavoro, che diventa evidente dalla riduzione della velocità di produzione dopo un periodo di inattività, e dalla produzione di prodotti di qualità inferiore rispetto a quelli creati durante il funzionamento continuo. Pertanto, la capacità di prevedere le prestazioni di un lavoratore alla ripresa del lavoro migliora la pianificazione della produzione e l'allocazione delle risorse. Inoltre, incorporare l'apprendimento in un processo di produzione diminuisce la fatica, il che può anche migliorare le prestazioni del sistema.

Per prevedere l'output di un operatore, quindi, le curve di apprendimento possono essere utilizzate. L'analisi di quest'ultime può essere utile per predire ratei di produzione in processi in cui è possibile contabilizzare gli output. In lavori caratterizzati da tasks ripetitive, le curve di apprendimento (LC) possono mostrare matematicamente e graficamente la performance di un lavoratore nel tempo. Secondo Jaber (2011), questo metodo è efficace per monitorare la performance dell'operatore in presenza di task ripetitive, fenomeno che porta alla

riduzione delle perdite di processo dovute all'inabilità nel primo ciclo produttivo, come riportato da diversi studi (Argote, 1999; Dar-El, 2000; Salameh and Jaber, 2000; and Jaber et. al., 2008). Le LC possono essere applicate per l'allocazione delle tasks ai lavoratori basandosi sul loro profilo di apprendimento, al fine di controllare al meglio le operazioni di produzione. Altre applicazioni delle curve di apprendimento includono il planning della produzione, la stima dei costi e il controllo degli stessi, l'allocazione delle risorse, il lot sizing e il product pricing.

Misure Calcolate

Secondo Miller (2001) la maggioranza delle misure di performance ha l'abilità di stimare le fluttuazioni durante alti livelli di *workload*. Come citato da Cegarra e Chevalier (2008), studi hanno mostrato una correlazione tra la scarsa performance nella task principale e il carico mentale provato dai partecipanti. Il *mental workload* richiesto in ogni data task può essere misurato, come abbiamo visto, da metriche di performance, tra cui il tempo richiesto, la velocità e il numero di errori. Bubb (2005) ha definito la probabilità di un errore umano (*Human error probability*, HEP) come la probabilità che una specifica task sotto osservazione fosse completata difettosa durante un certo lasso di tempo.

Matematicamente, l'HEP si esprime come segue:

$$\text{HEP} = \frac{\text{numero di errori osservati}}{\text{numero di errori possibili}} \quad (2.0)$$

Galy, Cariou and Melan (2012) citando uno studio di Fournier, Wilson and Swain (1999), nel quale valgono soggetti in una situazione di multitasking e i risultati rivelarono che la performance decresce all'aumentare del carico cognitivo, ciò

implica che un declino delle performance può essere un indicatore efficace del MWL. Inoltre, L'HEP crescere se il MWL aumenta.

2.4.3 Ergonomia cognitiva

L'ergonomia promuove un approccio olistico e human-centered al design dei sistemi di lavoro considerando fattori fisici, cognitivi, sociali, organizzativi e ambientali (Grandjean, 1986,; Wilson and Corlett, 1995; Sanders and McCormic, 1993; Chapaniz, 1995, 1999; Salvendy, 1997; Karwowski, 2001; Vicente, 2004; Stanton et al., 2004). Coelho (2011) definisce l'ergonomia come la disciplina scientifica che si occupa di capire le interazioni tra l'umano e gli altri componenti del sistema; questa professione applica principi teorici, dati e metodi al fine di disegnare un sistema ottimizzato per migliorare l'esperienza del lavoratore e la performance del sistema nella sua completezza. i domini in cui la disciplina ergonomica si applica sono tre: fisico, cognitivo e organizzativo.

L'ergonomia cognitiva, che ovviamente è quella di maggiore interesse ai fini del nostro trattato, si occupa dell'interazione tra gli strumenti e l'utente enfatizzando l'attenzione al processo cognitivo, al ragionamento e all'uso della conoscenza. In altre parole, è l'ergonomia dei processi mentali atta a migliorare le performance dell'operatore. L'argomento di principale interesse di questa disciplina scientifica in particolare è l'aspetto psicologico del lavoro, inteso in maniera bilaterale: come il lavoro condiziona la mente e come la mente condiziona il lavoro. Questo concetto si focalizza nel trovare un bilanciamento tra le abilità cognitive dell'uomo e le sue limitazioni applicando lo stesso ragionamento anche al sistema macchina, task e ambiente. Ciò può portare ad una riduzione del numero di errori con una conseguente performance migliore nell'ambito del

manufacturing. L'ergonomia cognitiva si focalizza sulla qualità del lavoro, includendo l'outcome del processo in questo ragionamento.

L'ergonomia tradizionale o fisica si occupa semplicemente della qualità del lavoro inteso come attività dell'operatore. Si focalizza quindi sulla riduzione dell'affaticamento dell'operatore e dello sconforto sperimentabile nel voler aumentare il throughput. Comunque, la natura del lavoro umano è cambiata drasticamente dal lavorare con il corpo a lavorare con la mente, siccome i sistemi industriali sono diventati più automatizzati. L'aumentata responsabilità della tecnologia insieme all'uso di procedure complesse ha imposto una richiesta cognitiva molto maggiore agli operatori di quanto non si domandasse in passato. Al posto della resistenza fisica, l'attenzione sostenuta è diventata più importante, così come al posto della prestanza fisica c'è un bisogno maggiore di capacità di problem solving. Inoltre, lavori che richiedono uno sforzo a livello fisico e allo stesso tempo uno sforzo mentale, possono influenzare il carico cognitivo in maniera negativa, indebolendo la lucidità mentale e causando performance inferiori. Per migliorare il design del sistema uomo macchina, lo stesso dovrebbe essere disegnato includendo ragionamenti appartenenti al campo dell'ergonomia cognitiva al fine di valutare gli elementi cognitivi delle tasks. La *figura 9* mostra uno schema più elaborato di quelli precedentemente esposti, che si pone come punto di partenza concettuale per quanto riguarda la progettazione e l'implementazione delle ergonomie cognitive. Notare come il

percorso è iterativo, e l'output finale in questo caso altro non è che il feedback, essenziale per lo sviluppo di questi sistemi.

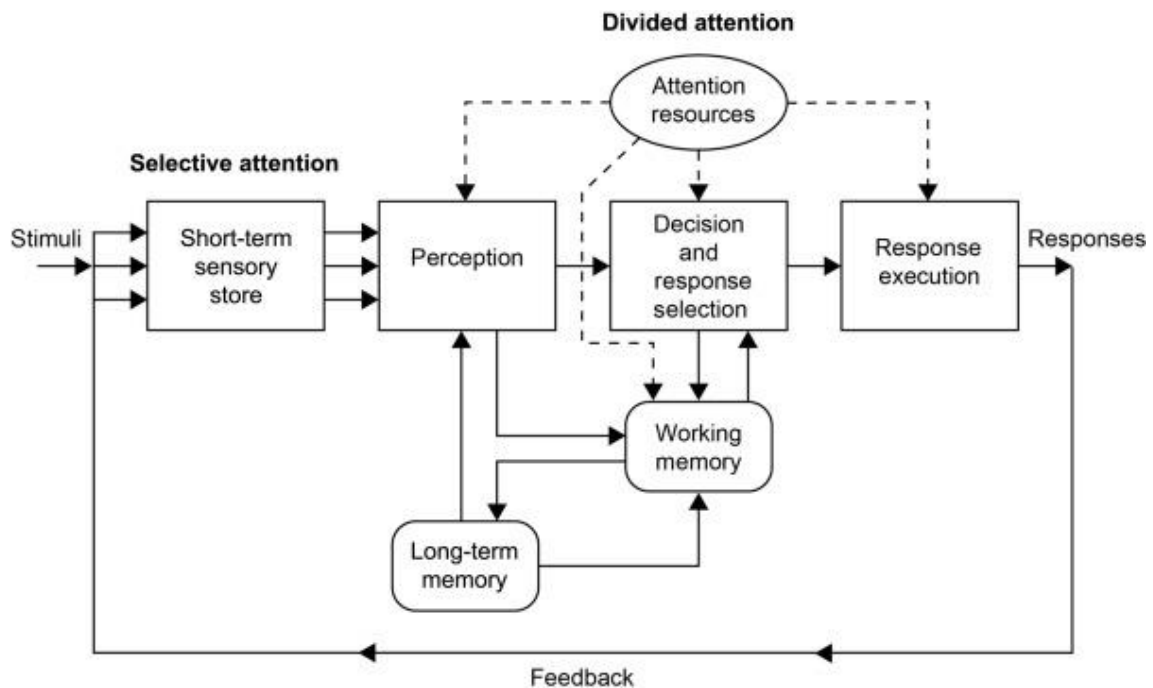


FIGURE 9: ELABORAZIONE DI UNO STIMOLO

2.4.4 Misure fisiologiche

Le misure fisiologiche del workload sono applicate per misurare continuamente la risposta fisiologica del corpo umano. Il vantaggio di queste misure è che non interferiscono con la performance durante le task primarie, anche se ciò dipende dal metodo utilizzato visto che alcuni metodi impongono delle costrizioni fisiche. L'uso di queste misurazioni tecniche come indicatori del MWL è basato sull'assunzione che all'incrementare della domanda dell'attività, sono visibili dei cambiamenti nelle risposte fisiche dei partecipanti. Queste risposte fisiche possono essere misurate con diverse attività corporee: cardiache, mentali,

respiratorie, orali e oculari. Ed è proprio tra queste misure che si colloca la tecnologia eye-tracking, come spiegato nel prossimo capitolo.

Capitolo 3

L'eye-tracking

3.1 L'eye-tracking

L'eye tracking è un metodo sperimentale per registrare il movimento degli occhi e la posizione dello sguardo nel tempo durante una task. È un metodo comune per osservare l'allocatione dell'attenzione visiva.

La tecnologia eye-tracking è un set di metodi e tecniche usati per studiare l'attività dell'occhio umano. La ricerca sui movimenti dell'occhio si è diffusa nel corso degli anni grazie soprattutto all'avanzamento della tecnologia di tracciamento oculare e alle teorie fisiologiche che mettono in relazione il comportamento dell'occhio e i processi cognitivi. Dal momento in cui i movimenti oculari forniscono delle informazioni sul problem solving, sul ragionamento, sull'immaginazione e sulle strategie di ricerca (Jacob e Karn, 2003), la ricerca psicologica ha largamente utilizzato metodi per investigare come i movimenti dell'occhio umano si relazionano ai processi cognitivi durante le tasks. Negli ultimi trent'anni, importanti miglioramenti nello sviluppo dei sistemi di eye-tracking hanno permesso di ottenere misurazioni migliori sul punto focale dello sguardo, con strumentazioni meno invasive. Una grande varietà di tecniche di eye-tracking è disponibile, e variano dall'analisi dal punto di vista del sistema a tecniche diagnostiche o interattive. "Nel ruolo diagnostico, l'eye-tracker fornisce prove quantitative e oggettive sulla visuale dell'utente e dei suoi processi attenzionali" (Duchowski 2002). Nel ruolo interattivo, i dispositivi eye-tracker rispondono o interagiscono con l'operatore sulla base dei movimenti oculari

osservati. Diversi sistemi sono stati sviluppati per registrare i movimenti dell'occhio durante le interazioni visive, oppure come input per dispositivi di comunicazione e controllo.

I movimenti oculari sono i più frequenti tra quelli che il corpo umano compie (Bridgeman,1992). Ampi movimenti balistici di scanning, chiamati saccadi, avvengono circa 3-4 volte al secondo. Stratton nel 1906 scrisse in suo trattato "il movimento dell'occhio sembra essere senza sosta, visto che la stazionarietà non dura per più di un istante". Inoltre, tutti gli animali con sistemi visivi sviluppati controllano il loro sguardo attivamente, usando movimenti degli occhi o comunque della testa.

Questi movimenti frenetici sono la conseguenza dell'enorme ammontare di informazioni visive che è possibile ricevere in input, e che il cervello poi deve essere in grado di processare. È però interessante il fatto che, piuttosto che analizzare tutto il campo visivo, il sistema nervoso umano si è evoluto in modo tale da focalizzarsi solamente su piccole parti della visuale, ossia l'insieme dei punti sui quali noi poniamo la nostra attenzione. Perciò, al posto che "scannerizzare" tutta la situazione nello stesso momento, il sistema visivo umano ispeziona una serie di punti, in rapida sequenza (Treue, 2001). Di conseguenza, l'occhio umano monitora un campo visivo di circa 200°, ma riceve informazioni solamente da un campo di 2° alla volta (Levi, Klein, & Aitsebaomo, 1985).

Questa regione, che quindi è molto ridotta, si chiama fovea, ed esegue spostamenti ad una velocità che può arrivare a 500° al secondo. Durante questi spostamenti la sensibilità dell'occhio è talmente ridotta che è simile ai livelli che si sperimentano nelle persone affette da cecità (Matin, 1974; Thiele, Henning, Kubischik, & Hoffmann, 2002). Questo movimento tra un punto e l'altro è chiamato

saccade. Infine, durante i 200–300 millisecondi in cui generalmente l'occhio si ferma, oltre 30.000 recettori densamente distribuiti nella fovea permettono una visione molto acuta e a colori. I punti in cui avviene l'elaborazione visiva si chiamano *punti di fissazione*.

I miglioramenti nella tecnologia eye-tracking hanno fatto sì che gli eye-trackers siano più economici e user friendly, sia per i partecipanti agli esperimenti che per i ricercatori. Gli eye-trackers basati sul video possono determinare la direzione dello sguardo con un elevato grado di accuratezza, misurando la posizione del riflesso della cornea tramite un sistema di illuminazione ad infrarossi. Questo sistema può essere trovato sia in sistemi da tavolo, che su sistemi indossabili, e permette l'eye-tracking in tempo reale, creando quindi la possibilità di estendere il campo delle ricerche nel mondo oculare, cosa che prima non era possibile a causa dello stato dell'arte di questa tecnologia. Lo sviluppo di questi sistemi ha fatto sì che, oltre all'aumento delle performance e delle possibilità, molti più ricercatori rispetto al passato si occupino di questo tipo di studi. Come risultato,

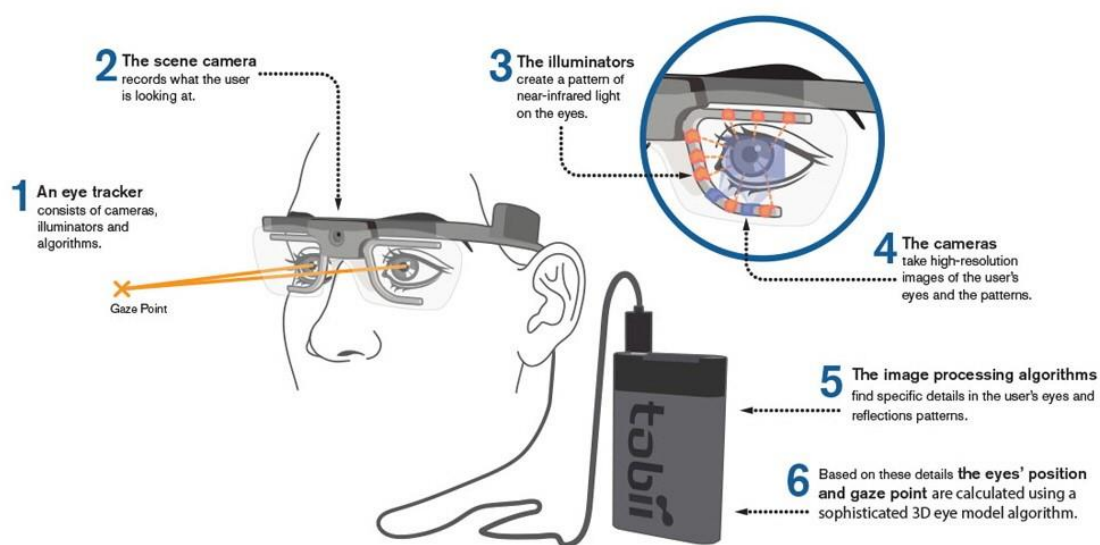


FIGURE 10: FUNZIONAMENTO OCCHIALI EYE-TRACKERS INDOSSABILI

l'uso di queste tecnologie è esploso negli ultimi 20 anni, in diversi campi della ricerca.

Un dispositivo eye-tracker (il cui funzionamento è spiegato in *figura 10*) misura dove, come e in quale ordine lo sguardo viene indirizzato durante un compito specifico. La struttura dell'occhio limita la visione ad alta acuità ad una piccola porzione del campo visivo (chiamata fovea; vedi Anatomia degli occhi, appendice A). Di conseguenza, c'è un forte bisogno di muovere gli occhi in modo che la fovea sia puntata verso qualsiasi stimolo che abbiamo intenzione di elaborare, in maniera conscia o inconscia. Questo è noto come il collegamento occhio-mente (Just & Carpenter, 1980; Rayner, 2009; Rayner & Reingold, 2015), e rende l'ET uno strumento affidabile per esplorare le domande riguardanti l'allocazione dell'attenzione visiva.

Dove guardiamo, e per quanto tempo, è influenzato da processi cognitivi che vanno oltre la semplice attenzione, come ad esempio la percezione, la memoria, il linguaggio e il processo decisionale. Mentre il legame tra occhio e mente non è assoluto (Anderson, Bothell, & Douglass, 2004; Murray, Fischer, & Tatler, 2013; Pickering, Frisson, McElree, & Traxler, 2004; Reichle, Reineberg, & Schooler, 2010; Steindorf & Rummel, 2019), è generalmente vero che gli occhi riflettono l'elaborazione mentale di qualsiasi cosa stiamo guardando in un dato momento. Ciò rende l'eye-tracking ampiamente applicabile alla maggior parte delle ricerche che esplorano i processi mentali. Grazie alla sua elevata sensibilità temporale, l'eye-tracking può fornire una visione momento per momento, piuttosto che elaborare semplicemente un output finale. Inoltre, la maggior parte dei movimenti oculari non è sotto diretto controllo conscio: un individuo può scegliere dove guardare e quando, ma l'analisi dei dettagli della situazione è un

riflesso; le persone, infatti spesso non sono in grado di ricordare con precisione che cosa guardano, ma solamente la scena che osservano (Clarke, Mahon, Irvine, & Hunt, 2017; Kok, Aizenman, Võ, & Wolfe, 2017). Questo significa che l'eye-tracking può entrare in processi non consci.

Visto che i movimenti oculari sono controllati da un sistema estensivo e distributivo, possono essere perturbati nel caso in cui il cervello sia danneggiato o abbia dei disordini (Castellanos et al., 2000; Dong et al., 2013; Huettig & Brouwer, 2015; Molitor et al., 2015; Roberts et al., 2012; Samadani et al., 2015; Wang et al., 2015). Le perturbazioni nella rete di controllo dei movimenti oculari nel cervello producono segni unici e misurabili, facendo dell'eye-tracking un metodo per individuare questo tipo di lesioni, oltre a poter individuare la loro localizzazione e alla loro gravità (Leigh & Zee, 2015). C'è quindi un potenziale per usare questa tecnologia con criteri diagnostici (Carter & Luke, 2018; Itti, 2015).

3.2 Basics sull'anatomia dell'occhio umano e sui suoi movimenti

Una comprensione della fisiologia dell'occhio dei suoi movimenti è utile al fine di poter comprendere al meglio come funziona la tecnologia in questione. La sezione che segue fornisce informazioni basiche, ma utili per capire la struttura dell'apparato visivo umano e il suo funzionamento, al fine di comprendere le basi anatomiche su cui si fonda la tecnologia eye-tracking.

3.2.1 Anatomia dell'occhio umano

Lo scopo degli occhi è quello di raccogliere, focalizzare e tradurre la luce. In molteplici aspetti il sistema assomiglia a quello delle macchine fotografiche, che funzionano tramite un diaframma che ha un'apertura variabile, delle lenti e una regione fotosensibile. Nel caso dell'occhio (schematizzato in *figura 11*), la luce entra attraverso la pupilla, il cui diametro controlla l'ammontare della luce entrante e l'intensità dell'immagine risultante. La cornea e le lenti focalizzano poi questa luce all'interno della retina, formando un'immagine invertita ma chiara (Kepler, 1604, 1611; Wade & Tatler, 2005). La ricostruzione dei dettagli e dei colori sono il principale prodotto di una struttura depressa al centro della retina, ossia la fovea, di cui si è già parlato in precedenza all'interno di questa tesi. Qui i fotorecettori sensibili alla luce, i *coni* sono molto concentrati. La luce che cade sulla fovea forma il centro del campo visivo, e i recettori di questa regione codificano con un alto livello di dettaglio. In altre parole, la fovea cattura un'immagine dettagliata di qualsiasi cosa sulla quale gli occhi siano puntati. La

fovea è una regione abbastanza piccola, con 1,5 mm di diametro, con la parte più sensibile che misura solamente 250 -300 μm , sempre di diametro. Ciò rappresenta solamente 1°20' di angolo visivo dei 140° disponibile per occhio (Clark & Kruse, 1990), il che in proporzione è la grandezza di un'unghia rispetto al braccio. La fovea è circondata da una sezione che si chiama *parafovea*, dove l'acutezza e la precisione sono minori, ma che è comunque in grado di analizzare delle informazioni (Rayner, 2009; Rayner et al., 1981).

Vista la dimensione molto ridotta della fovea, lo sguardo deve vagare per tutto l'ambiente visivo per collezionare informazioni su di esso. Questi movimenti sono coordinati da un complesso network di risorse che si trova tra la corteccia e il tronco cerebrale. Una volta raccolte, le informazioni visive vengono convolute al sistema nervoso centrale tramite il nervo ottico (CN II), che successivamente passa le informazioni al talamo, e quindi alla corteccia occipitale. A questo punto, un'immagine della scena viene creata e viene trasmessa agli altri centri corticali come il lobo parietale, temporale e frontale, per l'interpretazione e la reazione.

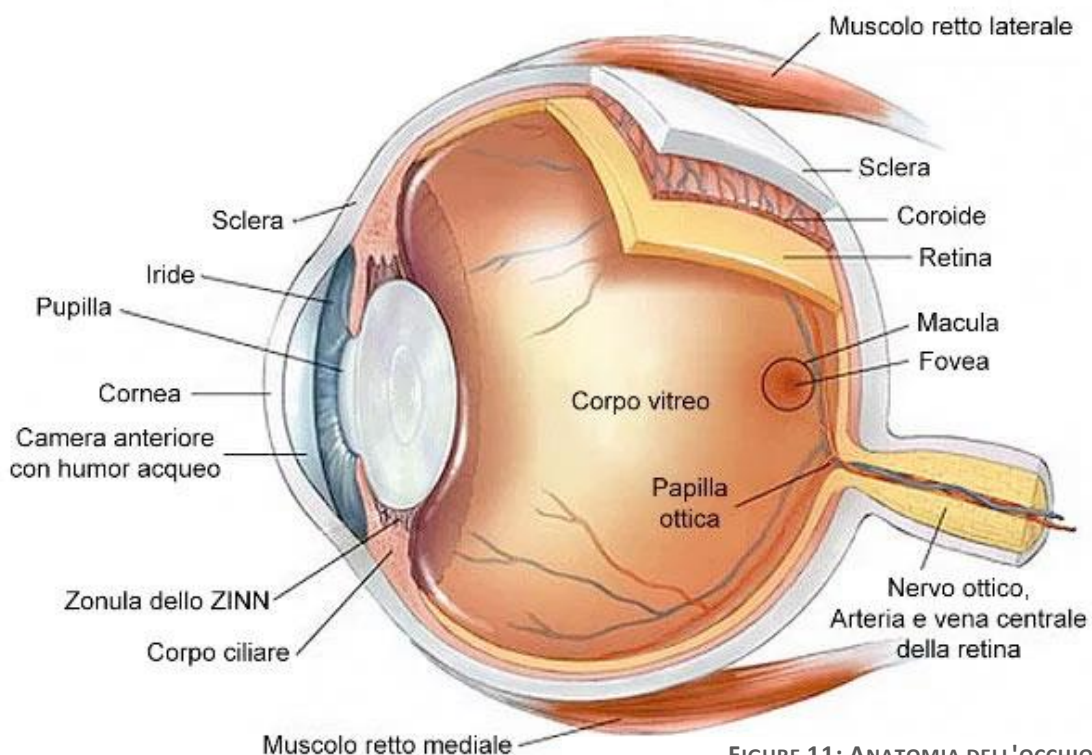


FIGURE 11: ANATOMIA DELL'OCCHIO UMANO

3.2.2 I movimenti oculari: fissazioni e saccadi

Una fissazione è un periodo di tempo durante il quale gli occhi sono fissati su un target visivo, la percezione è stabile e gli occhi stanno immagazzinando informazioni. Come discusso in precedenza, la fovea è una regione piccola, e per cui l'occhio non è in grado di acquisire informazioni ad alta qualità dall'intero campo visivo da una fissazione, e perciò è necessario che gli occhi si muovano frequentemente. La maggior parte delle fissazioni è quindi di breve durata; variano la loro lunghezza nel tempo in base a diversi fattori, come la natura dello stimolo visivo, lo scopo della task e la sua complessità, le skills e le capacità di attenzione dell'individuo; comunque generalmente durano almeno 180-300 ms (Rayner, 2009).

Le saccadi, invece, sono movimenti balistici dell'occhio che permettono di passare da una fissazione ad un'altra. Durante le saccadi, l'input visivo è soppresso, di modo tale quando l'occhio esegue questo particolare movimento, siamo effettivamente ciechi (Burr, Morrone, & Ross, 1994; Castet, Jeanjean, & Masson, 2002; Rolfs, 2015). La velocità e la durata delle saccadi sono una funzione diretta della distanza percorsa (Bahill, Clark, & Stark, 1975); variano in ampiezza e durata in base al compito che si svolge. Durante la lettura, ad esempio, lo spostamento è molto piccolo e quindi molto veloce (2° di rotazione per 30 ms); nella percezione di una scena il movimento è generalmente più grande, con circa 5° di rotazione per circa 50 ms di durata (Abrams, Meyer, & Kornblum, 1989; Rayner, 1978).

3.2.3 Altri tipi di movimento

Mentre le saccadi sono il movimento oculare più tracciato, ci sono altre forme in movimento che i ricercatori reputano di grande importanza. questi includono alcuni movimenti che, come le saccadi, possono essere fatti deliberatamente. Esempi di questi movimenti sono l'inseguimento di un obiettivo in movimento e la convergenza, ossia il fenomeno che accade quando si osserva un oggetto che si avvicina o si allontana da noi causando l'avvicinamento o l'allontanamento degli occhi tra loro. La *figura 12* mostra il funzionamento di fissazioni e saccadi durante la lettura di un testo.

Altri movimenti invece proprio non dipendono dal soggetto, in quanto sono completamente involontari. Un esempio lampante la variazione della grandezza della pupilla, movimento che viene modulato dall'antagonismo del sistema simpatico e parasimpatico del sistema nervoso. Lo studio dei movimenti della pupilla si chiama pupillometria. Altri movimenti riflessivi sono la risposta optocinetica (l'inseguimento di un oggetto nell'ambiente, seguito da un immediato ritorno alla posizione originale) e il riflesso vestibolo-oculare, ossia il movimento dell'occhio al fine di mantenere un'immagine stabile a seguito di un'attivazione vestibolare. Inoltre, anche durante una fissazione, gli occhi non

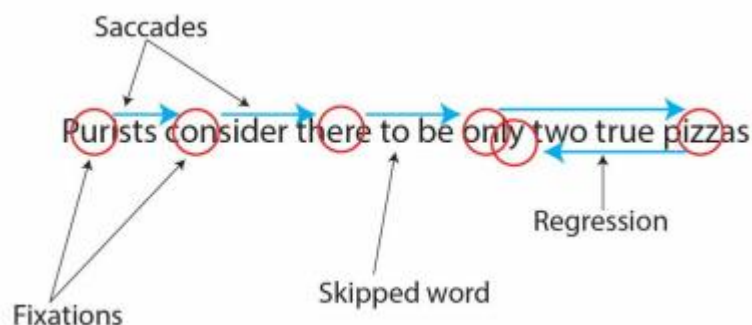


FIGURE 12: SACCADI, FISSAZIONI E REGRESSIONI

un'attivazione vestibolare. Inoltre, anche durante una fissazione, gli occhi non

sono mai completamente fermi, ma sono soggetti a tremolii, micro-saccadi e altri micromovimenti (Duchowski, 2017; Krauzlis, Goffart, & Hafed, 2017).

3.3 I dispositivi eye-tracker

Gli eye-trackers più moderni sono video-based. Proiettano luce sugli occhi, solitamente sottoforma di infrarossi, che l'essere umano non riesce a vedere. Questa luce produce un riflesso sulla cornea, identificato dal software di eye-tracking, così come viene identificato il centro della pupilla. Una calibrazione è necessaria all'inizio di ogni esperimento, dove il partecipante è tenuto a guardare una serie di punti in una location nota dello schermo. La calibrazione viene poi testata per essere dichiarata valida; se è stata effettuata nella maniera corretta, il punto esatto in cui il soggetto focalizza l'attenzione può essere stimato con un alto grado di accuratezza, basandosi sulla relativa posizione della pupilla e del riflesso corneo.



FIGURE 13: TOBII PRO GLASSES 3

Al fine di selezionare l'eye-tracker corretto ai fini del proprio esperimento è necessario considerare le necessità che tale esperimento impone. Infatti, i

trackers variano nell'ambito della velocità di acquisizione dei dati. Il sampling rate è misurato in Hertz (Hz). Il più veloce eye-tracker in commercio registra la posizione dell'occhio fino a 2000 volte al secondo (2000 Hz), mentre i dispositivi indossabili, come gli occhiali, hanno una capacità più ridotta, intorno ai 50 Hz. Perciò, se è necessario misurare i movimenti che si svolgono in millisecondi, c'è bisogno di un dispositivo molto potente; quando è sufficiente un sampling rate più basso vanno bene gli occhiali più economici, ma nel momento dell'esperimento sono necessari più dati per andare ad attenuare gli errori di misurazione. (Andersson, Nystrom, & Holmqvist, 2010). Se ad esempio lo scopo dell'esperimento è registrare dove lo sguardo del partecipante si dirige, degli occhiali con sampling rate più basso sono solitamente accettabili.

Alcuni trackers richiedono che la testa del partecipante rimanga immobile, altri invece permettono al capo di muoversi liberamente. La prima opzione è preferibile solo nel caso in cui la precisione sia il fattore più importante per lo studio, come nel caso in cui ci interessano siano i piccoli movimenti (ad esempio nella lettura dove si studiano le saccadi e le fissazioni). Comunque, gli eye-trackers che non prevedono l'immobilizzazione della testa forniscono livelli di accuratezza accettabili per molti scopi senza però avere l'impedimento di tenere il corpo fermo, causando disagi al soggetto dell'esperimento portando a risultati falsati. Anche se tipicamente, una mobilità maggiore significa minore precisione e accuratezza.

Alcuni eye-trackers tengono in considerazione entrambi gli occhi, mentre altri modelli entrambi; visto che gli occhi si muovono insieme, infatti, non è essenziale il tracciamento di entrambi. Il primo è il caso dei Tobii Pro Glasses 3 rappresentati in *figura 13*, che tracciano entrambi gli occhi e sono completamente mobili.

3.3.1 Utilizzo dell'eye-tracking

L'eye-tracking può essere impiegato in maniera diagnostica oppure interattiva (Duchowski, 2017).

L'uso diagnostico si riferisce alla registrazione della posizione dell'occhio attraverso un esperimento, per determinare dove i partecipanti guardano, per quanto tempo e in che ordine. Questo può essere fatto attraverso la visione di facce, scene, testi, video, pagine web e altri stimoli visuali. Questa tipologia di impiego è quella più usata dai ricercatori.

Quando si parla di eye-tracking interattivo, invece, si tratta ad esempio dell'uso di occhiali traccianti da parte di persone quadriplegiche per il controllo di un cursore. Per cui, l'alta sensibilità temporale e spaziale degli occhiali può essere sfruttata al fine di disegnare sistemi che consentono, grazie al solo sguardo, di attivare sistemi che altrimenti non sarebbero in grado di adoperare.

I cambiamenti nel display che sono attivati da dei movimenti oculari sono chiamati gaze contingent display changes. Un esempio di questa attività è la rivelazione dell'immagine sullo schermo solamente dopo che il soggetto ha fissato lo sguardo per più di 500ms. Un altro metodo utilizzato dai ricercatori, più complesso, è il metodo della finestra mobile (McConkie & Rayner, 1975; Schotter, Angele, & Rayner, 2012). In questo paradigma, una "finestra" viene creata sullo schermo intorno a qualsiasi cosa sulla quale lo sguardo è posato in maniera tale che le uniche entità visibili dal ricercatore siano quelle al centro del campo visivo, mentre tutto ciò che si trova al di fuori della finestra centrale viene oscurato. Come lo sguardo si sposta, la finestra si muove con esso, in maniera tale che chi sta dall'altra parte dello schermo possa vedere solo determinate cose al momento, senza avere una visione complessiva di tutto il sistema. Variando poi

la taglia della finestra e misurando ogni disruption nei movimenti oculari, questo metodo è stato usato al fine di esplorare lo span percettuale, l'area dello stimolo dal quale le informazioni sono ottenute. Quest'area non si limita semplicemente a quella catturata dalla fovea, ma può includere la parafovea e anche le regioni più periferiche (Nuthmann, 2013).

3.3.2 Qualità delle misurazioni

La qualità dei dati estrapolati con la tecnologia eye-tracking è solitamente descritta in termini di accuratezza e precisione. Le misurazioni sono accurate se la posizione dell'occhio misurata corrisponde al reale posizionamento, mentre sono precise se forniscono misurazioni consistenti sulla posizione dell'occhio nel tempo (Reingold, 2014). Questi due termini sono strettamente correlati con i più ampi concetti di validità e affidabilità, rispettivamente. I produttori di eye-trackers forniscono le specifiche relative a queste caratteristiche, valori che comunque riflettono il best case scenario. Perciò la reale performance dei dispositivi dipende da fattori che vanno oltre le specifiche di fabbrica, come ad esempio il setup, le procedure sperimentali, la condotta e la fisiologia dei partecipanti. (Blignaut & Wium, 2014; Ehinger, Groß, Ibs, & König, 2019; Hessels et al., 2015; Hutton, 2019; Nyström, Andersson, Holmqvist, & Van De Weijer, 2013). All'inizio di ogni sessione di eye-tracking, è necessario quindi effettuare una calibrazione. In questo stadio, si ha il controllo completo della qualità dei dati, e la calibrazione va condotta con molta cura al fine di ottenere un livello di precisione e accuratezza ideali. Siccome la qualità delle misurazioni si può degradare durante l'esperimento, soprattutto se questo necessita di molto tempo, è buona pratica programmare delle ri-calibrazioni durante la sessione.

Se poi per un particolare studio è necessaria una grande accuratezza, le calibrazioni vanno effettuate spesso.

La conoscenza del funzionamento degli eye-trackers rende la calibrazione più veloce, semplice ed accurata, il che fornisce una qualità dei dati superiore. Ad esempio, se la luce ad infrarossi non raggiunge l'occhio in quantità sufficiente, il sistema non funziona bene. Ciò può capitare nel caso in cui il soggetto partecipante indossa lenti correttive molto forti, o se gli occhiali sono sporchi o non provvisti di una copertura anti-appannamento. Può anche succedere che il partecipante sia troppo distante, oppure che la fonte di luce a infrarossi sia puntata nella direzione sbagliata.

Visto che la stima dei punti dello sguardo è impossibile senza la corretta identificazione della pupilla, fattori che ne impediscono il corretto riconoscimento riducono drasticamente la qualità delle misurazioni. Tali fattori includono soggetti parzialmente addormentati con gli occhi semichiusi, o ciglia molto scure a causa di make-up che possono ingannare il sistema facendogli credere che sia quella l'area scura da ricercare, al posto ovviamente della pupilla. Inoltre, qualsiasi cosa produca un riflesso esterno, come occhiali sporchi o il riflesso sulla cornea di una fonte luminosa, può oscurare il reale riflesso corneo e perciò interferisce con l'eye-tracking. Se la posizione della cornea è variabile in maniera non prevedibile, come capita quando si utilizzano lenti a contatto permanente e rigide oppure occhiali o lenti bifocali, il tracciamento è impossibile.

3.3.3 Eye-tracking data

Nella sua forma grezza, il tracking è composto da una serie di campioni. Ogni campione contiene la stima del punto dove si pone lo sguardo per uno o per entrambi gli occhi, sottoforma di coordinate x e y . Altre informazioni possono essere incluse, dipendentemente dal tracker usato e dal design dell'esperimento. Il numero di sample al secondo dipende appunto dal sampling rate. Per alcune ricerche (es. misurazione della pupilla o studi sullo smooth pursuit) è necessario lavorare come i dati grezzi; in altre circostanze invece questi dati vanno processati, per identificare fissazioni, saccadi e blinks. Per coprire dati perduti durante questo processo, un campione individuale viene categorizzato come fissazione se appartiene a un gruppo di campioni che sono relativamente vicini nello spazio l'uno con l'altro. Un sample diventa parte di una saccade se è temporalmente adiacente ad altri campioni in una direzione dello spazio, indicando che l'occhio sta svolgendo questo tipo di movimento. Generalmente gli eye-trackers disponibili in commercio processano questo tipo di dati in maniera automatica. C'è poi una moltitudine di software open access disegnati a questo scopo: alcuni sono per usi generali, mentre altri sono focalizzati su uno scopo specifico. Ogni pacchetto software, che sia commerciale o open access, analizza i dati usando un proprio e particolare algoritmo; quindi, è importante riportare che software è stato usato e come sono stati settati i parametri. Nella *tabella 2* viene riportato un esempio di database ricavato da un esperimento eye-tracking effettuato tramite virtual camera. Notare come gli intervalli di tempo delle coordinate dello schermo siano regolari e non arrotondati: sono derivati dal sampling rate.

TABELLA 2: DATI GREZZI RACCOLTI DA UNO STUDIO EYE-TRACKING

Time T_e	Screen coordinates		Time T_{VC}	Virtual camera position			Virtual camera orientation			
	X_e	Y_e		X_P	Y_P	Z_P	X_O	Y_O	Z_O	φ
0.000	656.766	310.623	0.00	614399.499	-5491986.750	8875.466	-0.086229	0.080814	0.99299	1.513003
0.016	653.206	308.557	0.05	614459.118	-5491552.406	8240.559	-0.069435	0.063555	0.99555	1.486856
0.033	651.496	328.351	0.1	614469.604	-5491335.470	7985.756	-0.062605	0.056629	0.99643	1.474200
0.049	662.581	330.732	0.15	614478.024	-5491045.674	7602.805	-0.051911	0.046220	0.99758	1.457339
0.065	656.937	331.423	0.2	614434.435	-5490616.335	7474.981	-0.049160	0.042743	0.99787	1.433477
0.082	657.144	310.858	0.25	614389.329	-5490186.457	7219.109	-0.042153	0.035787	0.99846	1.409320
0.1	651.879	317.655	0.3	614236.941	-5490186.457	6834.835	-0.031439	0.025339	0.99918	1.357556
0.116	647.510	308.491	0.35	614162.813	-5488909.231	6706.645	-0.027666	0.021854	0.99937	1.337729
0.133	649.713	336.521	0.4	614075.879	-5488559.279	6706.645	-0.028231	0.021854	0.99936	1.318106
0.149	648.897	311.643	0.45	614075.879	-5488559.279	6706.645	-0.028231	0.021854	0.99936	1.318106
0.166	660.495	318.914	0.5	614025.408	-5488348.799	6578.415	-0.024018	0.018367	0.99954	1.306149
0.183	663.701	321.978	0.55	613987.062	-5488209.711	6578.415	-0.024215	0.018367	0.99953	1.298299
0.199	651.608	318.245	0.6	613936.843	-5488074.037	6834.835	-0.033678	0.025338	0.99911	1.290854
0.216	655.255	325.567	0.65	613783.719	-5487593.231	6962.980	-0.039422	0.028819	0.99880	1.263648
0.233	654.025	299.932	0.70	613624.062	-5487114.705	6962.980	-0.040579	0.028818	0.99876	1.236193
0.249	651.869	316.639	0.75	613483.297	-5486705.719	6834.835	-0.036581	0.025335	0.99900	1.212388
0.265	663.881	320.672	0.8	613379.771	-5486436.565	6834.835	-0.037201	0.025334	0.99898	1.196695
0.281	662.608	317.651	0.85	613244.440	-5486102.465	6834.835	-0.037996	0.025334	0.99895	1.177081

In questo documento, nei capitoli seguenti, avrà luogo una discussione approfondita riguardante gli algoritmi di identificazione delle fissazioni, delle saccadi e di altri fattori importanti per l'utilizzo dell'eye-tracking.

3.4 Misure per l'eye-tracking

L'eye-tracking fornisce una vasta moltitudine di misure dipendenti per l'analisi. Questo fa sì che questa sia una tecnologia incredibilmente flessibile, che può essere applicata per effettuare diversi tipi di ricerche e tasks sperimentali. L'ampia varietà di queste misure, però, può anche portare a dei problemi. In questa sezione, verranno descritte alcune delle misure comuni che derivano dai dati di eye-tracking e le situazioni in cui esse vanno usate.

Come notato in precedenza, le fissazioni e le saccadi sono l'unità di base per la maggior parte delle analisi; perciò, ci si può concentrare sulla durata e locazione

delle fissazioni (durata media e numero di fissazioni) e sulle saccadi (ampiezza media). Queste misure possono rivelare come i partecipanti interagiscono con gli stimoli a livello globale.

Brams e ricercatori associati (2019), grazie ai loro esperimenti, hanno dedotto che quando gli esperti svolgono una task di visual scanning, hanno una durata media delle fissazioni notevolmente più lunga rispetto ai novizi. L'interpretazione data a questi risultati è che gli esperti passano più tempo focalizzati sui dettagli importanti degli stimoli, mentre i novizi "spargono" la loro attenzione tramite fissazioni multiple. Un altro esempio è l'esperimento condotto da Rayner, White, Johnson, and Liversedge (2006), che dimostra che quando le lettere di una parola in un test sono mescolate, i lettori in media fanno fissazioni più lunghe e in numero maggiore. L'incremento delle fissazioni e della loro durata dipinge un tipo di lettura più lento, più laborioso, indicando l'aumento dello sforzo cognitivo quando si ha un testo con parole che hanno lettere mescolate tra di loro. In uno studio sul riconoscimento delle emozioni in soggetti affetti da Anorexia Nervosa, Phillipou (2015) ha osservato che le persone affette da anoressia effettuavano più fissazioni e di minor durata, rispetto al gruppo di controllo. Questo tipo di comportamento caratterizzato dall'evitare gli sguardi altrui è chiamato "hyperscanning" (Horley, Williams, Gonsalvez, & Gordon, 2003), e si può trovare nelle popolazioni che soffrono di ansia clinica. Castelhana, Mack, and Henderson (2009) hanno osservato che i partecipanti all'esperimento eseguivano più fissazioni nell'atto di memorizzare una scena rispetto a quando erano tenuti a cercare un oggetto nella scena stessa; la durata media delle fissazioni e l'ampiezza delle saccadi però era analoga nelle due tasks. Questo pattern indica che i diversi tipi di viewing tasks influenzano il modo in cui i partecipanti guardano una scena, ma la poca differenza nella durata delle fissazioni e nell'ampiezza

delle saccadi suggerisce che il processo di interpretazione della porzione della scena fissata non differisce molto tra una task e l'altra.

Nella maggioranza degli studi di eye-tracking, i ricercatori vogliono conoscere per quanto o con che frequenza i partecipanti hanno guardato una particolare sezione proveniente da uno stimolo visivo, come ad esempio una particolare parola in una frase, un oggetto in una scena o gli occhi di un'altra persona. Quando l'obiettivo è di questo tipo, i ricercatori sono tenuti a creare delle regioni di interesse (conosciute appunto come aree di interesse), che contengono una parte interessante dello stimolo visivo. La maggior parte dei softwares di eye-tracking consentono di predefinire queste aree di interesse. Dopo la raccolta dei dati, il software li processa e fornisce una descrizione sull'interazione del soggetto con le aree di interesse, includendo variabili come quantità e durata delle fissazioni, il numero delle visite al soggetto e tempo totale speso su di esso. Il modo con cui le regioni di interesse vengono definite possono avere conseguenze sull'outcome dell'esperimento.

Se una o più regioni di interesse sono definite per uno stimolo, c'è la possibilità di introdurre diverse misure. Queste misure, in maniera generale, possono essere categorizzate temporalmente, in base allo stato del processo che indicano. Si dividono quindi in *early* e *late measures*. Le *early measures* si riferiscono alle misure che analizzano le fase iniziali del processo cognitivo; includono misure come la prima regione di interesse fissata, il tempo per effettuare la prima fissazione (dopo quanto tempo una regione di interesse è fissata durante una prova) e la durata della prima fissazione. Per esempio, in uno studio dove i partecipanti avevano il compito di individuare dei cambiamenti nel viso delle persone, Thompson, Foulsham, Leekam, and Jones (2019) hanno scoperto che le

prime fissazioni dei partecipanti erano di solito focalizzate sugli occhi, anche quando questi erano stati informati che il cambiamento sarebbe avvenuto, ad esempio, sulla bocca. Il tempo alla prima fissazione viene generalmente analizzato attraverso tasks di ricerca visuale. Un altro esempio è quello di Russell, Luke, Lundwall, and South (2019), che attraverso un esperimento che prevedeva la ricerca di bersagli in scene di contesto reali, hanno verificato che nei soggetti affetti da autismo il tempo per la prima fissazione era più esteso rispetto a ciò che accadeva con i soggetti di controllo.

Le *late measures*, invece, includono strumenti come il *dwell time* (l'ammontare totale del tempo spesso a fissare una regione di interesse), il numero delle fissazioni e la loro proporzione rispetto al numero delle fissazioni totali, sempre nelle regioni di interesse. Ad esempio, Kellough, Beevers, Ellis, and Wells (2008) hanno osservato che gli individui che soffrono di depressione hanno un *dwell time* maggiore quando si tratta di immagini negative, mentre è minore e si tratta di immagini positive; ciò indica un forte e stabile bias di attenzione verso stimoli spiacevoli quando si soffre di depressione. In uno studio riguardante la lettura condivisa di favole, Luke and Asplund (2018) hanno definito come aree di interesse le immagini nei libri. Una percentuale molto maggiore di quella che si aspettavano, per quanto riguarda le fissazioni, cadde sulle immagini (che occupavano in media il 68% dello schermo, ma che hanno raccolto il 92% delle fissazioni). La proporzione delle fissazioni sul testo fu quindi molto minore di quella che si aspettavano, indicando che i bambini non sono portati a focalizzarsi sul testo durante una lettura condivisa, ma piuttosto si focalizzano sulle immagini e non sulle parole. Quando si utilizzano misure tardive è quindi importante tenere a mente che generalmente non sono indipendenti dalle *early measures*; una *late*

measure come il dwell time include per forza di cose il first fixation time, per forza di cose.

Spesso, gli studi analizzano molteplici misure basate sulle regioni di interesse al fine di analizzare l'allocazione dell'attenzione nel corso del tempo. Ad esempio, Werthmann et al. (2011) hanno esplorato i bias attenzionali verso il cibo nel caso di persone in sovrappeso. Hanno usato tre misure, due di tipo early (*first region of interest, duration of the fixation*) e una di tipo late (dwell time). Le persone sovrappeso erano più portate a dirigere il primo sguardo verso l'immagine del cibo, e la durata della prima fissazione era più lunga rispetto al gruppo di controllo; non mostravano però un bias verso le immagini del cibo in termini di dwell time. I ricercatori hanno interpretato questi risultati indicando che il cibo catturava ma non manteneva l'attenzione delle persone sovrappeso, durante il loro studio. Võ and Henderson (2009) hanno osservato che i partecipanti, durante l'osservazione di una scena, hanno un dwell time maggiore e compiono più fissazioni verso le aree di interesse che contengono oggetti inaspettati, oppure oggetti in posizioni inaspettate. Comunque, il tempo alla first fixation non differisce, suggerendo che gli oggetti che vanno contro le aspettative mantengono l'attenzione, ma solo nel caso in cui riescano a catturarla.

La distinzione tra early e late measures è prominente negli studi sulla lettura. In questo caso, misure early includono la probabilità di word skipping, la durata della prima fissazione, e durata dello sguardo (la somma di tutte le fissazioni che avvengono ogni volta che si incontra una parola nuova. Le misure late includono la probabilità di regressione, il dwell time (in questo caso inteso come tempo passato a leggere) e conteggio totale delle fissazioni. Ad esempio, uno studio effettuato da Knickerbocker et al. (2019) ha notato che le parole che si collegano

direttamente ad emozioni (es. compleanno, funerale) hanno un vantaggio in termini di processamento rispetto a parole neutre e vengono lette più velocemente; l'ammontare di questo vantaggio dipende però dall'accezione della parola (positiva o negativa). In maniera specifica, le parole che si collegano ad emozioni positive mostrano vantaggi nelle early measures, in particolare nella word skipping probability e nella first fixation duration, ma anche nelle misure tardive. Nelle parole che si collegano ad emozioni negative, invece non mostrano un vantaggio nei confronti delle parole neutre nel caso delle early measures, ma lo dimostrano nelle misure di tempo totale e regressione, entrambe misure tardive. Questa differenza indica che l'effetto delle parole negative viene alla luce più tardi nel corso della lettura.

3.5 Misure eye-related per quantificare il carico cognitivo

***Blinks* (battiti di ciglia)**

La durata dei battiti di ciglia e la loro frequenza sono stati identificati come metrica alternativa per misurare il carico cognitivo. Non è comunque, purtroppo, una metrica universale e affidabile al 100%, in quanto il blinking rate può essere influenzato anche dal carico visivo, oltre che da quello mentale.

Dimensione della pupilla

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.

Attività pupillare causata dalle attività

La risposta pupillare è correlata con le performances (Palinko, 2020), e il suo studio sembra confermare l'affidabilità della pupillometria come misura del carico cognitivo. Comunque, l'analisi svolta è limitata a simulazioni di tasks con bassa variabilità di illuminazione del target. E' possibile contrastare l'effetto dei cambi di luminosità in contesti reali, grazie a calcoli complessi che verranno presentati poi in seguito.

Palinko ha sviluppato, in un altro studio, un proof of concept della possibile separazione tra gli effetti della luce e quelli del carico cognitivo, nel campo della dilatazione pupillare. Lo studio è stato condotto avvalendosi di un simulatore di guida, avvalendosi di un sistema di *Aural Vigilance Task Illumination* (con diversi livelli target di luminosità), e di un test di validazione. I risultati dello studio hanno dimostrato che dovrebbe essere, almeno teoricamente, possibile modellare le funzioni psicofisiche della risposta pupillare alla luce nel tempo, e mostrare il trend misurato. Inoltre, viene notato come le transizioni chiaro/scuro/chiaro non sono sempre analoghe, visto che differenti gruppi muscolari sono responsabili dei movimenti di contrazione e dilatazione. La reazione alla luce intensa è 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, innanzitutto prendere in considerazione parametri multipli, come i livelli di luce correnti e quelli precedenti, la frequenza

delle variazioni, l'età e il target. Lo studio di Palinko conclude che è possibile differenziare gli effetti dell'illuminazione e dello sforzo cognitivo quando si studia il diametro pupillare, è che il "proof of concept" sviluppato funziona nei limiti del setting sperimentale.

3.6 Pupillometria

Come notato in precedenza, gli eye-trackers moderni tracciano l'occhio identificando la pupilla; ciò significa che molti di questi dispositivi possono essere usati in maniera efficace per la pupillometria.

La pupillometria è una tecnica che registra i cambiamenti nel diametro della pupilla. La grandezza di quest'ultima cambia in risposta a cambi di luminosità (con una latenza di approssimativamente 200 ms (Ellis, 1981)), ma non solo: le pupille si dilatano e si restringono in risposta a processi cognitivi/affettivi interni come ad esempio i cambi di attenzione, motivazione, effort mentale e carico cognitivo (Beatty & Lucero -Wagoner, 2000; Einhäuser, 2017; Laeng & Alnaes, 2019; Laeng et al., 2012; Mathôt, 2018). La maggior parte delle ricerche psicologiche si focalizza su queste dilatazioni cognitive/affettive, che sono più piccole rispetto ai cambiamenti dati dagli impulsi luminosi.

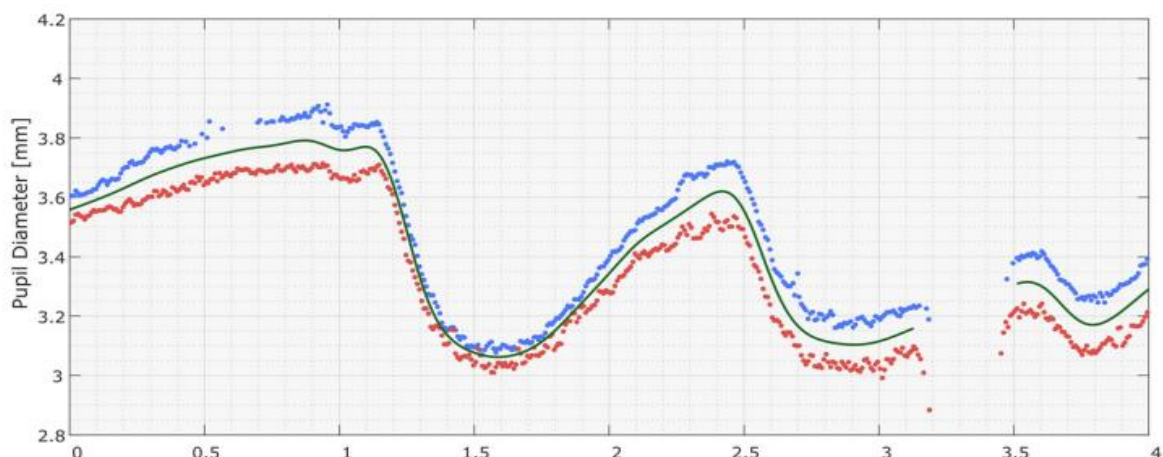


FIGURE 14: DIAMETRO DELLA PUPILLA NEL TEMPO

Come l'eye-tracking in generale, la pupillometria è diventata più popolare in questi ultimi anni. È usata al fine di studiare una grande varietà di argomenti, tra cui la percezione, lo sviluppo, il linguaggio, le emozioni, il supporto sociale, il carico cognitivo e il carico di memoria, la memoria nella sua forma più generale e i processi di decision making.

Visto che i dispositivi eye-tracker possono fornire delle stime sulla dimensione della pupilla, associate al tracciamento dello sguardo, si potrebbe pensare che effettuare le due misurazioni in un singolo esperimento sia una buona idea. In generale però, non sempre lo è, almeno che la ricerca non abbia esattamente quello scopo. Errori sistematici nella stima della dimensione della pupilla possono avere luogo nel caso in cui gli occhi siano soggetti a movimenti. Inoltre, mentre gli occhi esplorano qualche stimolo visivo, le pupille si adattano alla luminosità delle diverse aree di un'immagine. Questo cambiamento comincia prima che il movimento dell'occhio sia eseguito e può addirittura accadere senza che l'occhio si muova affatto, come nel caso dei cambiamenti focali o attenzionali (Binda & Murray, 2015; Mathôt et al., 2016). Questo significa che i movimenti oculari creano un rumore nei dati di pupillometria, che può facilmente sovrastare i piccoli cambiamenti nella dimensione della pupilla dovuti a fattori cognitivi e affettivi. Nella *figura 14* si può osservare l'andamento della dilatazione pupillare nel tempo.

Gli stimoli visivi più complessi tra quelli usati nella maggior parte degli studi di eye-tracking sono caratterizzati da una luminanza non uniforme, situazione che crea un grande rumore visivo anche nel caso in cui gli occhi non si muovano. Per queste ragioni, negli esperimenti in cui si vogliono utilizzare dispositivi eye-trackers per studi di pupillometria, è importante istruire i partecipanti a

mantenere lo sguardo fisso al centro della scena che si vuole usare come mark. Gli stimoli uditivi sono ideali per gli studi di pupillometria, siccome l'input visuale non cambia pur creando un effetto di qualche tipo al soggetto in questione. Gli stimoli visivi si possono quindi usare, ma devono essere semplici, abbastanza piccoli da entrare nel campo della fovea e l'illuminazione deve essere costante e consistente, senza fluttuazioni di alcun genere (o è importante cercare di ridurle al massimo).

Quando si riportano i risultati degli studi di pupillometria, è importante indicare le informazioni sul setup e sul tipo di dispositivo utilizzato; bisogna inoltre fornire informazioni dettagliate su come i livelli di luminosità vengono resi stabili nel corso dell'esperimento. È essenziale descrivere come i diversi stimoli a cui il soggetto viene sottoposto vengono adattati alla situazione luminosa, specialmente sotto condizioni variabili, per evitare confusioni. Infine, i livelli di luminosità della stanza dove è condotto lo studio, insieme agli sforzi applicati per rendere costanti questi livelli per tutti i partecipanti, vanno anch'essi riportati.

Dati di pupillometria affidabili, se il procedimento è svolto in maniera corretta, possono essere ottenuti anche tramite eye-trackers relativamente economici (Titz, Scholz, & Sedlmeier, 2018). Infatti, visto che la pupillometria si basa su campioni individuali piuttosto che su dati aggregati come invece richiedono gli studi su fissazioni e saccadi, gli eye-trackers con un sampling rate elevato forniscono una quantità di dati inutilmente grande per questo scopo. Però è importante notare che, anche a livelli di sampling bassi, è necessaria una grande capacità computazionale per elaborare dati di pupillometria. Infatti, ci sono considerazioni uniche in questo processo: i dati richiedono spesso delle correzioni su una baseline, visto che le variazioni sono calcolate solitamente basandosi su

un valore settato all'inizio dell'esperimento (Mathôt, Fabius, Van Heusden, & Van der Stigchel, 2018; Reilly et al., 2019).

3.6.1 Wavelet Analysis

Marshall et al. (2011) descrivono una tecnica per identificare l'origine di una risposta pupillare, in maniera indipendente dalla luminanza del soggetto target. La procedura impiega la wavelet analysis per identificare i riflessi di dilatazione nella pupilla del soggetto. Viene spiegato in che modo i riflessi vengono differenziati, basandosi appunto sul fatto che la pupilla risponde in maniera diversa agli stimoli luminosi e a quelli psicosensoriali. In condizioni di illuminazione stazionarie, la pupilla esegue delle pulsazioni irregolari (riflessi leggeri) provocate dall'interazione tra muscoli circolari (agonisti, che eseguono le contrazioni) e quelli radiali (antagonisti), che invece sono responsabili della dilatazione. Un carico cognitivo provoca una forma d'onda differente da quella che si presenta in assenza di attività, siccome entrambi i muscoli, circolari e radiali, dilatano la pupilla creando un breve picco di dilatazione. Questo fenomeno implica che il *workload cognitivo* può essere misurato come la frequenza e l'intensità di tali fenomeni, e non come la semplice dilatazione della pupilla costante nel tempo, quando si è soggetti ad un carico (per la durata dello stesso). Non è tuttavia chiaro come questo concetto possa essere applicato nella realtà, con la presenza ovviamente di grande variabilità luminosa. La *figura 15* mostra un esempio di wavelet analysis.

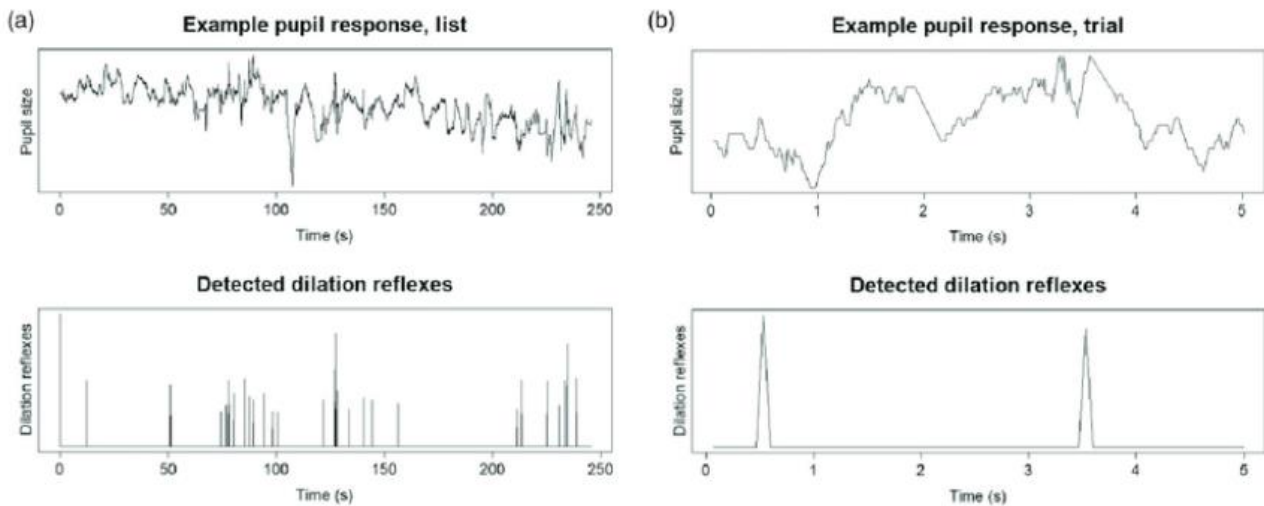


FIGURE 15:WAVELET ANALYSIS

3.6.2 Formula unificata per la dimensione della pupilla adattata alle condizioni luminose

Visto che il diametro della pupilla è influenzato da fattori multipli e concorrenti tra di loro, per differenziare correttamente gli effetti del carico cognitivo da quelli della risposta alla luce è utile registrare il diametro pupillare in una determinata condizione luminosa e usare il valore risultante come baseline. Basandosi su questo valore, possono essere calcolate le fluttuazioni nella sua dimensione causate dal carico cognitivo. Watson et al. (NASA Ames Research Center and University of California, 2012), hanno revisionato sette diverse funzioni psicofisiche, definendo la relazione tra la luminanza del target (cd/m^2) e il diametro pupillare atteso. A questo studio si deve la pubblicazione di una nuova formula unificata, atta a prevedere il diametro della pupilla dato esclusivamente dall'effetto luminoso. La baseline calcolata rientra nell'intervallo tra 2 e 8 mm, e la formula dovrebbe essere in grado di assicurare che la più piccola variabilità di

diametro della pupilla dovuta al carico cognitivo sia comunque individuabile (± 1 mm). La formula, comunque, è valida solamente in condizioni di luce e punto di vista del soggetto stabili, e inoltre non tiene conto dello stato di adattamento e dell'“unrest pupillare” (fluttuazioni casuali a bassa frequenza nel range tra 0.02 e 2.0 Hz con ampiezza ± 0.25 mm).

Variabili indipendenti dell'equazione:

- a. Luminanza
- b. Età (il diametro pupillare massimo, così come il range totale, diminuisce con l'età)
- c. Diametro del campo visivo (in gradi)
- d. Numero di occhi stimolati, il diametro finale dipende dal numero di occhi adattati alle condizioni luminose.

Viene quindi definita l'“Effective corneal flux density” (la variabile che controlla l'effettivo diametro della pupilla) come variabile dipendente (attenuata con un fattore di 10 per un occhio solo).

$$F = LaM(e) \quad (3.0)$$

Dove (F) è la densità di flusso nella cornea come prodotto di (L) luminanza, (a) area e (M(e)) effetto monoculare.

3.6.3 Tool per la valutazione quantitativa del carico cognitivo tramite la pupillometria

Visto che, come ampiamente discusso, le condizioni di luminosità variabile hanno un impatto molto grande sulla dilatazione della pupilla, è necessario

separare gli effetti del carico cognitivo da quelli della variazione luminosa al fine di poter riconoscere e valutare lo stress mentale a cui è sottoposto un operatore. La relazione tra il carico cognitivo e la dimensione della pupilla risale al 1964, quando Hess e Polt hanno misurato cambiamenti nel diametro durante semplici problemi matematici, e hanno osservato un legame tra la risposta pupillare e il livello di difficoltà. In maniera analoga, Kahneman (1967) ha ipotizzato la correlazione tra la risposta pupillare e tasks ad alto utilizzo di memoria; il risultato dei suoi studi riporta che l'ampiezza della risposta pupillare è correlata alla difficoltà delle tasks. Questi risultati iniziali furono validati per una varietà di attività cognitive intense, come la scrittura, l'ascolto, il discorso e la soluzione di problemi matematici.

Gli studi di questo tipo però sono limitati principalmente da tre fattori:

1. La luminanza percepita, definita appunto come la variabile che ha la maggiore influenza sul diametro della pupilla, nascondendo l'influenza del carico cognitivo.
2. Il tracking in tempo reale è possibile solamente attraverso un numero limitato di metodi, siccome è richiesta un'alta risoluzione temporale, un controllo delle variabili ambientali con la conseguente stima continua della baseline. Una lacuna in queste componenti fondamentali risulta in delle limitazioni nell'analisi di tasks ben definite e separate.
3. La mancanza di documentazioni e studi di tipo open source, dato che attualmente le tecnologie sono per lo più brevettate e non modificabili da terzi; è perciò disponibile agli utilizzatori solo un'esigua quantità di documenti e informazioni relative al funzionamento reale

dell'apparecchiatura. Ciò rende difficile l'utilizzo ai ricercatori indipendenti, che sono impossibilitati a migliorare tali sistemi in base alle loro esigenze.

Il carico cognitivo descrive l'ammontare di risorse di tipo working memory utilizzate. Siccome le risorse di questo tipo sono limitate in natura, l'ammontare e la complessità delle informazioni disponibili per l'elaborazione è limitata. Quando il limite viene superato si verifica un *overload* cognitivo, che può diminuire, ad esempio, l'apprendimento, la performance e l'esperienza accumulata. Eckert, Habets e Rummukainen (2021) propongono un metodo per stimare il carico cognitivo partendo dalla dilatazione della pupilla su sei gradi di libertà, usando un dispositivo di realtà virtuale (VR) in uno scenario con illuminazione incontrollata. Difatti, i visori VR possono avere lo stesso scopo di eye-trackers più convenzionali, ma sono più accurati a livello di misurazione della pupilla, dato che non ci sono interferenze luminose provenienti dal mondo esterno. Ciò significa che sono presenti meno variazioni di diametro dovute alla luce.

Una stima del carico cognitivo può essere vista come un outcome oggettivo variabile per migliorare l'esperienza in VR dell'utente, ad esempio, con designs che usano in maniera efficiente la capacità di working memory tramite l'integrazione multimodale, o che permettono una regolazione dinamica per controllare i livelli di stress indotti dal sistema di realtà virtuale. Inoltre, le esperienze di tipo VR possono rappresentare uno strumento unico per investigare il carico cognitivo, in quanto permettono di simulare esperienze reali in un ambiente controllato. È perciò più facile eseguire un tracking in tempo reale con questo tipo di setup. Questi metodi possono fornire un importante supporto ai self-ratings proposti agli utenti, come ad esempio il NASA-TLX, che sono tuttora lo strumento più utilizzato per definire il carico cognitivo. Comunque, i self-reports di questo tipo sono altamente soggettivi e possono essere collezionati solamente

dopo la simulazione. Per andare oltre a queste limitazioni, i metodi di valutazione oggettivi hanno aumentato il loro interesse con l'avanzare del tempo. Vari segnali psicofisiologici si correlano al carico cognitivo, come anche, oltre a quelli discussi in questo documento, l'elettroencefalogramma (EEG), l'elettrocardiogramma e la respirazione. Comparando i risultati che si ottengono con questi metodi, il migliore risulta essere, oggettivamente, l'EEG, seguito dalla dilatazione pupillare. Però, effettuare misurazioni tramite l'elettroencefalogramma richiede, tramite in metodi convenzionali, un hardware specializzato e molto costoso, con un'importante fase di setup, rendendo perciò la misurazione della pupilla la più attraente alternativa, grazie alla facilità di utilizzo dei dispositivi richiesti a tale scopo.

La correlazione positiva tra la dimensione della pupilla e il carico cognitivo è spiegata dalla TEPR (task evoked pupillary response). La TEPR si è dimostrata un valido indicatore neurofisiologico per una grande variabilità di tasks ad alta intensità, come il ragionamento, la percezione e l'utilizzo della memoria a breve termine. Comunque, questo non è l'unico indicatore che tiene conto dei cambiamenti di diametro della pupilla. Come già detto il PLR (pupillary light reflex) è l'indicatore più influente, e per eliminarlo in maniera completa bisognerebbe operare in condizioni di luce stabile, condizione raramente possibile. Bisogna perciò compensare l'effetto del PLR, calcolare una baseline in maniera continuativa per distinguere gli effetti della luce da quelli del carico cognitivo. Visto che però è difficile quantificare la luce in un contesto reale, naturale o artificiale che sia, la maniera migliore per fare questi ragionamenti è quella di utilizzare un visore VR, dove la luce può essere facilmente controllata e quantificata. Siccome molti di questi visori presentano questa funzione, questo rappresenta un metodo facile, veloce, senza bisogno di costosi e richiedenti

setup e inoltre, cosa più importante, permette la misurazione in tempo reale del diametro pupillare

3.6.4 Un metodo per stimare il carico cognitivo dalla dimensione pupillare, riducendo l'effetto della luce

Nell'esperimento di Eckert, Habets e Rummukainen (2021), la dimensione della pupilla di ogni occhio viene misurata dal sistema eye-tracker integrato nel visore VR Vive Pro Eye. Tale sistema fornisce misurazioni in tempo reale in millimetri ed elimina i dati non validi, come ad esempio i *blinks*. L'elaborazione dei dati non venne portata oltre. Il diametro della pupilla e la luminosità della scena vennero tracciati con la frequenza di 4 Hz e 2Hz, rispettivamente. Il *Lab Streaming Layer* è stato usato per registrare e sincronizzare i dati raccolti.

Per svelare gli effetti del carico cognitivo, quindi, gli effetti del PLR vanno compensati. Una funzione di mapping sigmoideale è stata utilizzata per mettere in relazione tutti possibili valori di luminosità con la dimensione della pupilla, e tale funzione è stata poi usata per mitigare gli effetti della luce in tempo reale, per ciascun partecipante all'esperimento.

Nello studio, l'unica luce emessa considerata era quella all'interno di un cerchio con raggio di dimensione della metà del display, centrato su di esso. Una metrica affidabile per quantificare la luminosità percepita è definita nello schema dei colori CIE XYZ. La componente Y, quella di maggior interesse, descrive la luminanza del colore. Può essere calcolata con in valori sRGB, lo standard per le colorazioni degli schermi digitali. Per effettuare questi calcoli, due operazioni sono

necessarie. Per prima cosa, i valori non lineari sRGB (R0G0B0) devono essere linearizzati in valori RGB, per tutti e tre i valori di colore, usando:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{C'}{12.92}, & C'' \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C + 0.055}{1.055}\right)^{2.4}, & C'' > 0.04045 \end{cases} \quad (4.0)$$

con $C \in \{R, G, B\}$.

La luminanza Y , che è compresa tra 0 e 1, dove 0 corrisponde al colore nero e 1 al bianco, è elaborata usando

$$Y = 0.2125 \times R + 0.7154 \times G + 0.072 \times B \quad (4.1)$$

L'influenza della luminanza calcolata sulla dimensione della pupilla è predetta dalla funzione sigmoide sopra citata. Per ogni partecipante la funzione è stata adattata in base ai dati raccolti durante sei diverse sessioni di calibrazione. La dilatazione prevista, $d(Y)$, causata dalla luminanza Y è quindi stata espressa come:

$$d(Y) = a \times d_0 + (b \times \Delta d \frac{1}{1 + e^{(Y-0.25) \times \frac{c}{\Delta y}}}) \quad (4.2)$$

Dove d_0 è la dimensione della pupilla alla luminanza $Y=0$, Δd è la differenza tra la più grande misura della pupilla e la più piccola, e Δy il range di luminanza durante le fasi di calibrazione. I parametri a , b e c sono inseriti, rispettivamente, nei limiti $[0.4, 1]$, $[0.5, 2]$ e $[3, 5]$.

La dilatazione della pupila prevista $d(Y)$ viene poi sottratta dalla misurazione con un ritardo di 0.5s, in modo da prendere in considerazione il tempo di reazione della pupilla, $dCL = dm - d(Y(t-0.5))$ (4.3). Il risultato ottenuto è quindi una stima della dilatazione causata dal carico cognitivo.

Infine, la dimensione media della pupilla, misurata per entrambi gli occhi in ogni fase dell'esperimento, è stata usata per l'analisi dei risultati. Per tener conto delle variazioni della baseline della dimensione della pupilla, i valori di dilatazione della stessa nei vari blocchi di esperimento sono stati normalizzati con media zero e variazione standard pari a 1, per ogni partecipante.

I risultati di questo studio hanno quindi supportato le ipotesi formulate in precedenza. Gli organizzatori dell'esperimento sono stati in grado di usare un visore VR con un eye-tracker integrato per confermare la correlazione tra la dimensione della pupilla ed il carico cognitivo, trovata in studi precedenti. In contrasto con gli esperimenti antecedenti al loro, però, non hanno controllato le condizioni luminose. Al posto di fare ciò, hanno implementato una procedura che gli permettesse di raccogliere e analizzare dati in tempo reale, compensando l'effetto della luce tramite le correzioni viste in precedenza. Questo studio ha perciò confermato che, dopo le correzioni, la luminosità della scena non ha più impatto sulle variazioni della dimensione della pupilla rilevanti al fine dello studio. È un risultato molto importante, siccome il superamento di questi limiti permette l'utilizzo dei sistemi VR in molti nuovi setups, come ad esempio l'esplorazione libera in 6 Gradi di Libertà. Questo lavoro, comunque, pone certi limiti. Per primo, questo tipo di correzioni potrebbe non essere preciso al 100% su tutti i partecipanti all'esperimento, rendendo non completamente affidabili i risultati ottenuti. Un possibile miglioramento potrebbe essere quello di tracciare l'area intorno al punto di fissazione, dandogli un peso maggiore rispetto al resto della scena. Nello studio, questo viene fatto, considerando solamente il centro dello schermo per il calcolo della luminanza. Ma i cambiamenti nella direzione dello sguardo spesso comportano anche dei cambi di focalizzazione; questi cambi di focalizzazione comportano a loro volta piccoli cambiamenti di diametro della pupilla. In futuro,

perciò, è necessario determinare se ciò accade anche durante l'utilizzo di visori VR. Nello studio appena esposto, non è stato tenuto conto di ciò: nessun punto focale per la calibrazione è stato stabilito, e uno spostamento di punto focale dei partecipanti, durante la calibrazione, avrebbe causato una distorsione dei risultati durante l'esperimento. Quindi, è importante che studi futuri si concentrino sul trovare un miglior metodo di calibrazione.

Concludendo questo sottocapitolo, utilizzare questo tipo di setup per effettuare uno studio sul carico cognitivo è la soluzione ottimale, nel caso in cui la realtà virtuale sia accettabile. La correzione della luminosità proposta compensa l'influenza della luce sulla dimensione della pupilla sufficientemente da usare la pupillometria in condizioni di luce incontrollata, in un ambiente in realtà virtuale. Nel futuro però, sarà necessario svolgere studi più approfonditi al fine di migliorare la precisione delle correzioni (ad esempio l'inclusione della compensazione del punto focale) e il miglioramento della calibrazione.

3.6.5 Machine learning per la pupillometria

Wierda et al.(2012) e il correlato lavoro di Ferscha (2019) et al. rappresentano un approccio differente al problema della misurazione indiretta del mental workload. Visto che la risposta della pupilla ad uno stimolo mentale è troppo lenta (misurabile in secondi) per essere usata come misura in tempo reale, può essere usata solamente sottoforma di tempo di risposta medio. Questo approccio è utile nel valutare tasks di lunga durata che sono caratterizzate da un carico costante in un intervallo di tempo, che deve essere lungo almeno alcuni secondi. Questi due studi mostrano un proof of concept di come ottenere un tracking ad alta risoluzione temporale tramite, appunto, la misurazione di tempi

medi. Lo scopo di una misurazione del cognitive load in tempo reale ha luogo principalmente nell'implementazione di sistemi di interazione nei design (ad esempio un sistema che è in grado di rispondere a differenti stati cognitivi dell'utente).

Wierda et al. hanno fissato la distribuzione degli "impulsi di attenzione" ogni 100 ms, definendo la risoluzione temporale dell'output. Tramite i modelli della "task evoked pupil impulse response" (TEPR), si può ricostruire l'intensità dell'impulso di attenzione che ha provocato la risposta pupillare misurata. Ferscha et al. hanno sviluppato ulteriormente il concetto tramite il machine learning, eliminando il bisogno di una risoluzione temporale fissa degli impulsi cognitivi. Per ridurre gli effetti della luce ambientale, inoltre, hanno utilizzato l'illuminazione media del campo visivo del soggetto, analizzando il materiale video fornito dall'eye-tracker. Comunque, le tecniche usate a questo scopo sono probabilmente ancora insufficienti per adattare la tecnologia a degli studi con alta variabilità luminosa. Nell'implementazione descritta, un cambio di luce più significativo del valore stabilito come massimo indurrebbe ad una sospensione del tracking; questo stato sarebbe quindi mantenuto finché la condizione sia nuovamente stabile, rendendo quindi possibile il calcolo di una nuova baseline. Una soluzione simile è stata implementata per filtrare i battiti di ciglia. La baseline dinamica è computata tramite una serie di limiti di luminosità, e non si adatta per piccoli cambi di luminanza nel bersaglio.

3.7 Fissazioni e saccadi

Il processo di identificazione delle fissazioni, separando ed etichettando le fissazioni e le saccadi in protocolli di eye-tracking, è una parte essenziale

dell'analisi dei dati ricavati dagli studi sui movimenti oculari, e può avere un grande impatto sulla validità delle analisi. Questo processo di identificazione, altro non è che l'elaborazione di dati grezzi, sottoforma di punti sullo schermo, in punti di fissazione riconosciuti (e implicitamente le saccadi tra di essi) sul display. Questo processo riduce significativamente la dimensione e la complessità del database, rimuovendo i dati e semplificando la visione. Questo processo è utile per almeno due ragioni: per prima cosa, i punti che derivano dalle saccadi sono dati insensati siccome non c'è processamento visivo durante questi movimenti (come già detto in precedenza, durante le saccadi si è praticamente ciechi) e così facendo tali dati non vengono presi in considerazione; in secondo luogo, movimenti millimetrici avvengono durante le fissazioni, come tremori, derive e piccole anomalie. Il raggruppamento dei singoli punti in fissazioni e saccadi snellisce perciò in maniera importante le analisi che vengono effettuate a posteriori del processo di raccolta, mantenendo però inalterate, anzi, migliorando le caratteristiche dello studio al fine di ottenere una comprensione del carico cognitivo ottimale. La *figura 16.0* rappresenta l'output di un'analisi sottoforma di *Heatmap*, che vedremo in seguito.

L'identificazione delle fissazioni è quindi una descrizione statistica dei movimenti oculari osservati. Se è generalmente riconosciuto che un'elaborazione visiva e cognitiva ha luogo durante le fissazioni, non si può dire lo stesso sulla chiarezza con il quale esse cominciano e finiscono. Nonostante la precisione e la flessibilità associate ad algoritmi di identificazione, il processo per effettuare tale stima è ancora soggettivo. Difatti, una maniera efficiente di convalidare i risultati di questi algoritmi è tramite la valutazione soggettiva di un osservatore. Ne deriva che, algoritmi di identificazione non chiaramente definiti hanno come risultato un riconoscimento e quindi un conteggio sbagliato di queste fissazioni, o possono

essere troppo sensibili ai dati outlier, fornendo perciò un'identificazione sbagliata. È molto importante quindi, la scelta di un algoritmo che sia valido e che si adatti al meglio alla situazione analizzata.

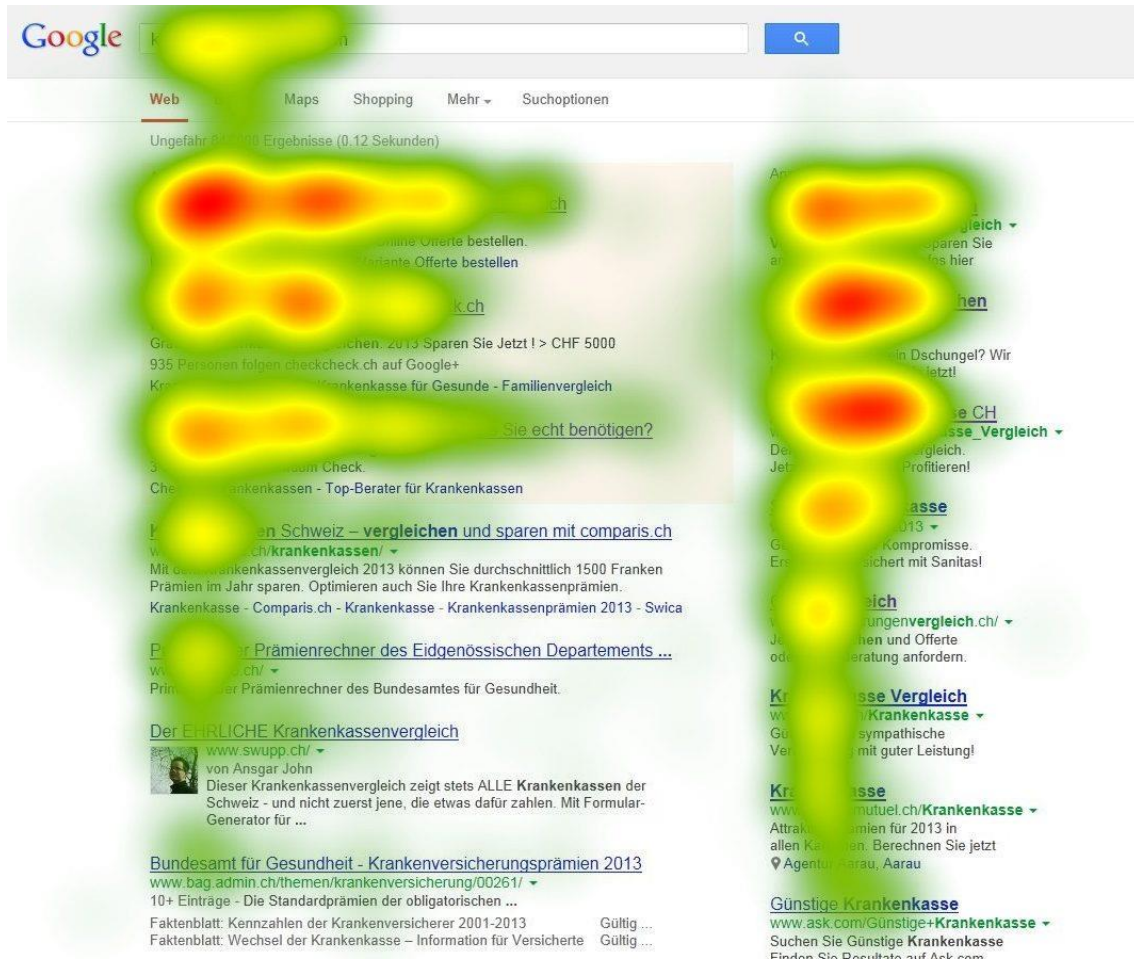


FIGURA 16.0: HEATMAP

Uno studio di D. Salvucci (2000), per quanto non troppo recente, ha cercato di fornire gli adeguati strumenti al fine di risolvere questi problemi. Al tempo attuale, le sue argomentazioni sono ancora valide, e i risultati del suo studio forniscono delle importanti linee guida per il nostro caso. Una tassonomia per gli algoritmi di identificazione delle fissazioni viene perciò definita. La divisione principale che viene fatta è tra algoritmi spaziali e temporali. I criteri spaziali dividono gli algoritmi in termini di uso delle informazioni relative alla velocità, dispersione e

aree di interesse. I criteri temporali, invece, dividono gli algoritmi in termini di utilizzo della durata dell'informazione e di adattabilità locale. La tassonomia fornisce una definizione significativa e una classificazione degli algoritmi esistenti, in modo che questi possano essere comparati facilmente tramite un procedimento sistematico al fine di guidare la scelta degli algoritmi in base alla necessità

3.7.1 Tassonomia degli algoritmi di identificazione delle fissazioni

Come detto in precedenza, per quanto riguarda gli algoritmi spaziali, vengono utilizzati tre criteri per identificare tre tipologie primarie di algoritmo, dividendoli ulteriormente i algoritmi basati sulla velocità, sulla dispersione e sull'area dei punti registrati durante gli esperimenti. I principali algoritmi sono riassunti in *tabella 3*.

TABELLA 3: ALGORITMI E CRITERI PER DIFFERENZIARLI

Criteria		Algorithm				
		I-VT	I-HMM	I-DT	I-MST	I-AOI
Spatial	Velocity based	x	x			
	Dispersion based			x	x	
	Area based					x
Temporal	Duration sensitive			x		x
	Locally adaptive		x	x	x	

I primi tengono conto delle informazioni riguardanti la velocità appunto, visto che durante le fissazioni i punti hanno bassa velocità mentre durante le saccadi è

l'opposto (è importante notare che, assumendo un sampling rate costante, le velocità sono semplicemente le distanze tra i punti e perciò si può ignorare la componente temporale implicita nella definizione di velocità). I secondi tengono conto della dispersione dei punti di fissazione, sotto l'assunzione che i punti di fissazione non si verificano mai l'uno accanto all'altro. I terzi invece, identificano in punti all'interno di aree di interesse (AOIs) che rappresentano bersagli visivi rilevanti. Questa tipologia di algoritmi, a differenza delle altre due, fornisce sia un'identificazione di basso livello che un'assegnazione di alto livello delle fissazioni alle AOIs. Visto che le fissazioni possono essere anche usate come input degli algoritmi AOIs, possono rappresentare livelli di focus attenzionale più alti sugli schermi. Questi *dwell times* possono essere considerati come macro-fissazioni, visto che organizzano le stesse in una visione più ampia.

Gli algoritmi temporali invece sono divisi secondo due criteri. Il primo, che utilizza informazioni sulla durata delle fissazioni, è guidato dal fatto che la durata di queste raramente è minore di 100ms, anzi il solito range è 200-400ms. Il secondo, che tiene conto dell'adattabilità locale, mette in relazione ogni data point con gli altri punti adiacenti; questo torna utile, ad esempio, per compensare le differenze tra gli individui che abitualmente tendono lo sguardo fisso da quelli che mostrano movimenti oculari ampi e frequenti.

3.7.2 Algoritmi basati sulla velocità

Velocity-Threshold identification (I-VT)

È il più semplice degli algoritmi di identificazione da capire ed implementare. I-VT è un metodo di identificazione basato sulla velocità che separa i punti di

fissazione da quelli di saccade basandosi sulla velocità degli stessi. Generalmente, la divisione è di tipo binario: i punti con velocità <100 deg/sec sono da considerarsi punti di fissazione, mentre quelli con velocità >300 deg/sec sono punti appartenenti alle saccadi. Questo tipo di discriminazione è riconosciuto come valido e robusto. È possibile formulare delle considerazioni differenti per aree differenti in modo da aumentare l'adattabilità dei risultati, ma grazie alla forte relazione tra i profili di velocità e fattori di tipo fisico e psicologico, i criteri statici e generali sono solitamente sufficienti.

L'algoritmo I-VT inizia calcolando le velocità da punto a punto per ogni sample raccolto. Ogni velocità è quindi definita come la distanza tra il punto attuale e quello precedente (o successivo). I punti vengono quindi classificati come saccadi o fissazioni in base al threshold stabilito: se la velocità di quel punto è inferiore alla soglia, viene definito come fissazione, altrimenti come saccade. Il processo, quindi, raggruppa i punti di fissazioni consecutivi in gruppi e fa lo stesso con i punti di saccade. Infine, I-VT traduce ogni gruppo di fissazioni in una rappresentazione $\langle x,y,t,d \rangle$ dove x,y,z sono le coordinate spaziali e d è la durata. Un esempio di output è presentato in *figura 16*.

Questo algoritmo richiede la specifica, quindi, di un solo parametro, appunto la velocità. Se la velocità angolare può essere calcolata (ciò è possibile solo se si conosce la distanza tra l'occhio e lo stimolo visivo), la soglia di velocità può essere espressa come deg/sec, altrimenti ciò non è possibile. Ad esempio, Sen e Megaw (The effects of task variables and prolonged performance on saccadic eye movement parameters (1984)) hanno fissato per il loro studio un threshold di 20 deg/sec. In ogni caso, bisogna cercare di esprimere la soglia con l'unità di misura che meglio si adatta allo studio compiuto.

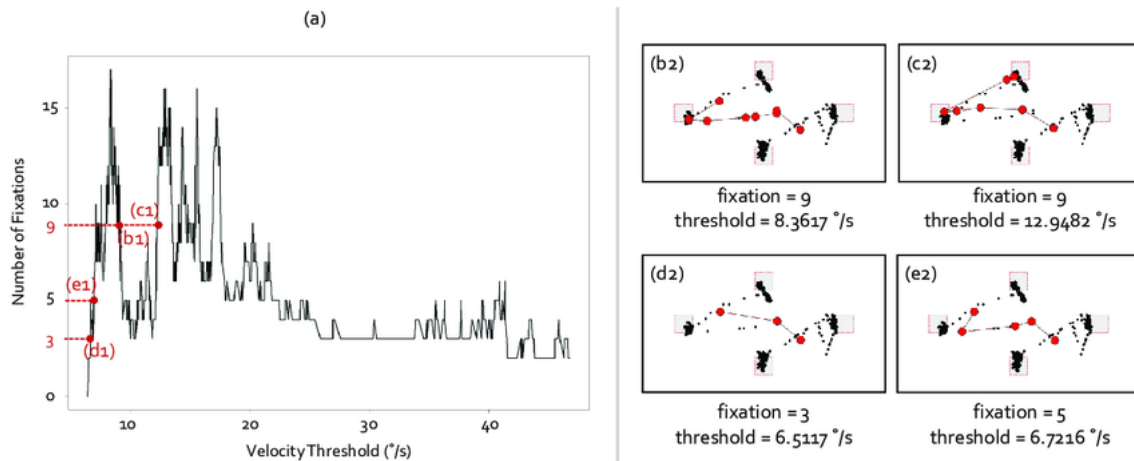


FIGURE 16:OUTPUT DELL'ALGORITMO I-VT

HMM Identification (I-HMM)

Il modello di identificazione delle fissazioni Hidden Markov (I-HMM) utilizza l'analisi probabilistica al fine di determinare l'identificazione più probabile per un dato protocollo (Mapping eye movements to cognitive processes Salvucci, D. D. (1999)). Questa tipologia di modelli è stata impiegata estensivamente durante le

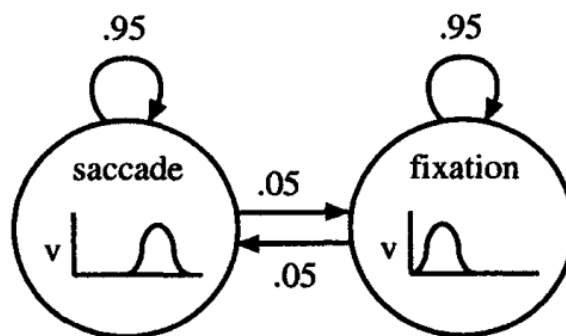


FIGURE 17:ESempio di HMM a due stati. IL PRIMO STATO RAPPRESENTA I PUNTI DI SACCADDE AD ALTA VELOCITÀ; IL SECONDO INVECE QUELLI A BASSA VELOCITÀ

analisi di lettura e scrittura. Gli I-HMM usano un HMM a due fasi i cui gli stati rappresentano le distribuzioni delle velocità per i punti di fissazione e di saccade. Questa rappresentazione probabilistica permette una rappresentazione più robusta rispetto al metodo a soglia fissa I-VT. La caratteristica principale del I-HMM è la doppia condizione mostrata in figura.

Infatti, l'HMM include due sets di probabilità: le probabilità di osservazione e quelle di transizione. Le probabilità di osservazione per ogni stato rappresentano la distribuzione delle velocità attese in quel determinato stato. Il primo stato rappresenta i punti di saccade, e quindi contiene una distribuzione centrata sulle alte velocità. Il secondo stato rappresenta i punti di fissazione, per cui la distribuzione è centrata sulle basse velocità. Le probabilità di transizione per ogni stato (le frecce presenti in *figura 17*) rappresentano la tendenza a rimanere in quella condizione oppure di traslare verso l'altra. In questo specifico caso descritto in figura, la probabilità di rimanere in ogni stato è molto alta (0.95), mentre quella di spostarsi verso l'altro è ridotta (0.5). quindi, l'HMM fornisce una rappresentazione probabilistica delle osservazioni generate durante i movimenti saccadici dell'occhio.

Dati quindi i due stati HMM, l'algoritmo determina l'identificazione più probabile per ogni punto del protocollo tramite un processo di decodifica. Questo processo assegna i punti trovati tramite gli eye-trackers agli stati che massimizzano la probabilità del protocollo, dato l'HMM, usando una programmazione dinamica

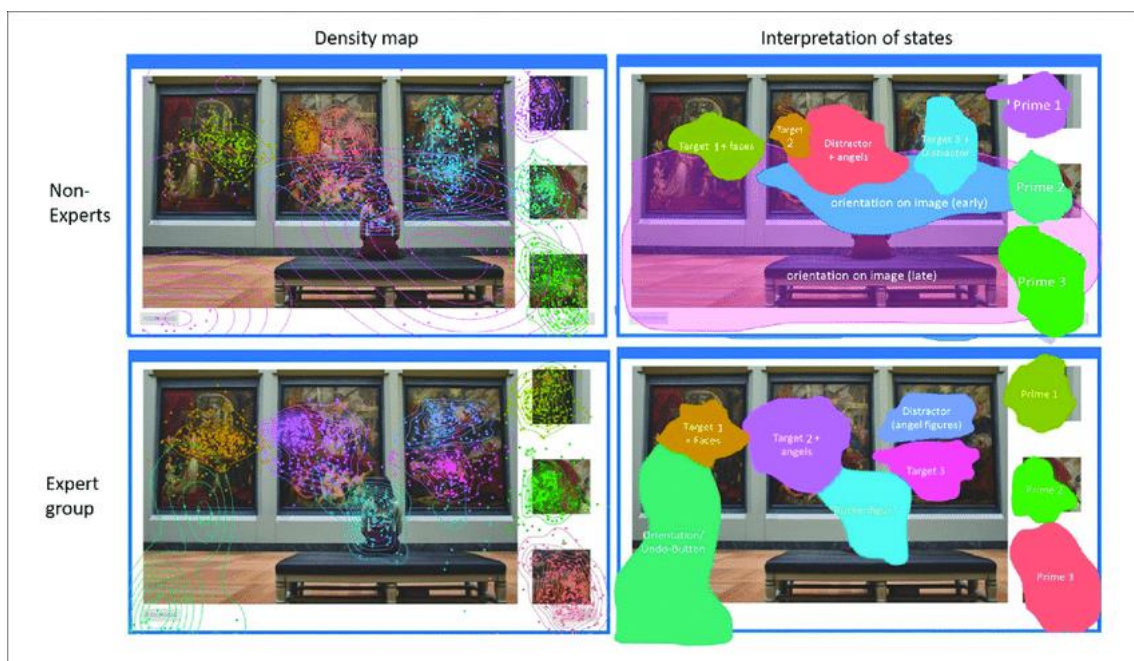


FIGURE 18:OUTPUT GRAFICO DI I-HMM

per trovare le assegnazioni ottime in maniera efficiente. Le assegnazioni associano quindi ogni punto ad uno stato, fornendo perciò l'identificazione di ogni punto come saccade o fissazione. Come I-VT, I-HMM quindi condensa i punti di fissazione consecutivi in gruppi e fornisce in output il punto centrale di tale gruppo. Un esempio di output e di elaborazione dello stesso è mostrato in *figura 18*.

I parametri dell'I-HMM separano, quindi, i parametri di transizione e osservazione in due stati HMM: due parametri di probabilità di osservazione (la media e la varianza delle distribuzioni) e due probabilità di transizione, per ogni stato, per un totale quindi di 8 parametri. Sicuramente questo algoritmo è molto più complesso di I-VT i parametri di I-HMM possono essere appresi tramite una procedura chiamata rivalutazione. Dando in input un set di protocolli di "allenamento", la rivalutazione permette all'algoritmo di apprendere come massimizzare la probabilità di questi protocolli dato HMM. Perciò, con i dati di protocollo da un particolare setup di eye-tracking, la rivalutazione può fornire valori parametrici che, una volta stimati, possono essere usati con ogni protocollo fornito da tale particolare setup.

3.7.3 Algoritmi basati sulla dispersione

Dispersion-threshold identification (I-DT)

In contrasto agli algoritmi basati sulla velocità analizzati in precedenza, I-DT utilizza il fatto che, vista la loro bassa velocità, tendono a formare dei cluster localizzati. I-DT, quindi identifica le fissazioni come gruppo di punti consecutivi con una particolare dispersione, valutando la separazione massima tra gli stessi.

Visto che le fissazioni, tipicamente, hanno una durata di almeno 100 ms, gli algoritmi basati sulla dispersione spesso incorporano una soglia di durata minima di 100–200 ms per punto. I-DT, in particolare, è basato sull'algoritmo di data reduction di Widdel (Operational problems in analysing eye movements Widdel, H. (1984)).

L'algoritmo di identificazione si basa su un concetto per cui una finestra si muove lungo i punti consecutivi del protocollo alla ricerca di potenziali fissazioni. Tale finestra inizia dal primo punto del database e analizza i punti un determinato numero di punti in sequenza. La durata di tale sequenza è determinata dalla soglia di durata minima assegnata e dal sampling rate del setup di eye-tracking. I-DT controlla quindi la dispersione dei punti nella finestra sommando le differenze tra i valori di massimo e di minimo delle variabili spaziali x e y, ossia:

$$D = [\max(x) - \min(x)] + [\max(y) - \min(y)] \quad (5.0)$$

Se la dispersione trovata è sopra i valori di soglia, la finestra analizzata non rappresenta una fissazione, e il procedimento continua. Se invece la dispersione è sotto la soglia, è una fissazione. In questo caso, la finestra si espande finché la finestra di dispersione supera la soglia. L'intervallo finale è registrato finalmente come fissazione nel centro dello stesso, con annessi i dati relativi al tempo di inizio e alla durata. Questo processo continua finché tutti i punti del protocollo non sono stati analizzati.

Questa caratterizzazione delle fissazioni usa il centroide e il diametro. Un'area circolare viene generalmente creata, e la distanza media calcolata tenendo conto di ogni campione fornisce una stima del raggio di tale fissazione. Inoltre, gli algoritmi basati sulla dispersione sono usati a volte per localizzare dei clusters

all'interno delle rappresentazioni del minimum spanning tree network, ossia il prossimo algoritmo che andremo ad analizzare.

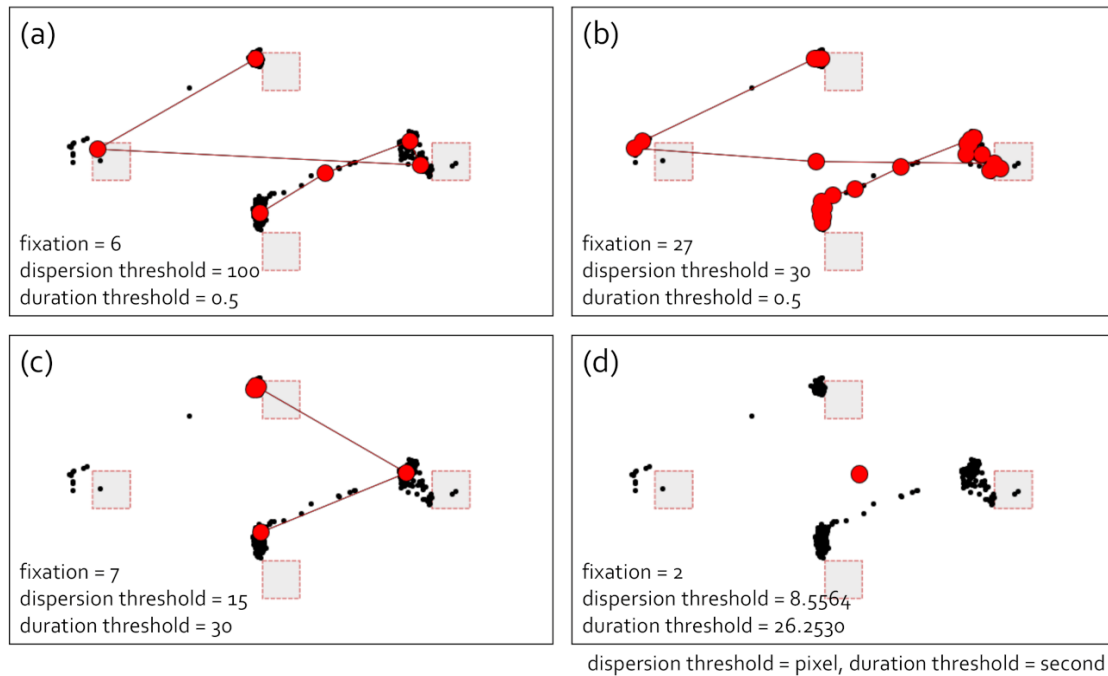


FIGURE 19: OUTPUT DI I-DT

L'algoritmo I-DT richiede due parametri, la soglia di dispersione e di durata. Analogamente alla soglia di velocità per I-VT, il threshold per questo algoritmo può essere fissato nell'intervallo tra $\frac{1}{2}^\circ$ e 1° , se la distanza tra l'osservatore e lo schermo è conosciuta. Altrimenti, la soglia può essere stimata studiando il database, per adattarla al meglio alla situazione analizzata. La soglia della durata, invece, è tipicamente settata tra i 100 ms e i 200 ms, in maniera dipendente dalla richiesta delle tasks.

Bisogna però notare che la caratterizzazione di I-DT è concettualmente diversa da altri metodi basati sulla dispersione che si concentrano su algoritmi di clusterizzazione. Il problema di suddetti algoritmi è che richiedono, spesso, una stima iniziale del numero di clusters presenti nel protocollo, facendo sì che siano

meno efficaci per studi di eye-tracking. La *figura 19* mostra un esempio di output di I-DT.

Identificazione MST (I-MST)

L'identificazione MST è basata sull'algoritmo minimum spanning tree (MST), ossia uno schema di collegamenti tra un set di punti in maniera tale che la lunghezza totale del percorso dal primo all'ultimo punto dia minimizzata. L'MST può fornire un'alta flessibilità ed una rappresentazione controllabile per l'identificazione delle fissazioni basata sulla dispersione. Un approccio a due fasi è necessario, in quanto come prima cosa è necessario costruire il diagramma MST, segue poi la ricerca del percorso minimo, che è unico per ogni set di punti. Il vantaggio di questa rappresentazione risiede quindi nei gradi di controllo, nella flessibilità e nelle capacità di adattamento locali. L'insieme di questi fattori dà vita a una valida caratterizzazione delle fissazioni.

Il funzionamento dell'algoritmo è il seguente: per prima cosa bisogna effettuare una ricerca *depth first*, al fine di determinare la profondità massima dell'interconnettività di ogni punto. I punti vicini ai limiti dell'MSTA non vengono considerati in quanto si ritiene che non possano separare le diverse fissazioni. Se gli angoli connessi ad ogni punto finale eccedono la minima definita minimum branching depth, allora il network degli angoli connessi ad ogni punto finale è raggruppato in una distribuzione. La media μ e la deviazione standard σ delle lunghezze dei punti sul bordo fornisce una comparazione a livello locale per la separazione delle fissazioni. La separazione può avere luogo sulla base di comparazioni tra il bordo preso in considerazione e la media e la deviazione standard della distanza dai bordi vicini. In questo modo, un framework viene

strutturato permettendo il controllo su dove le fissazioni possono avere luogo, determinando anche come l'adattabilità locale influisce sulla decisione delle fissazioni.

Il formato MST permette una caratterizzazione addizionale dei parametri di fissazione. Ad esempio, la lunghezza dell'MST è definita dal percorso più lungo attraverso il grafico. Questi ed altri parametri permettono una stima della forma e della possibile direzione delle fissazioni; queste vanno oltre la semplice caratterizzazione del centroide e della dimensione.

3.7.4 Algoritmi basati sull'area

Area-of-interest identification (I-AOI)

I quattro metodi di identificazione precedenti sono in grado di identificare le fissazioni in ogni luogo del campo visivo. In opposizione, l'identificazione delle fissazioni di tipo Area Of Interest (I-AOI) identifica solamente le fissazioni che avvengono in una determinata area di interesse. Le aree bersaglio sono regioni rettangolari che rappresentano le unità di informazione nel campo visivo. Queste aree, generalmente utilizzate in analisi ex-post, hanno come obiettivo quello di rilevare le fissazioni che avvengono vicine al bersaglio scelto. I-AOI definisce una soglia di durata per permettere la distinzione dei punti di saccade e di fissazione in quelle determinate aree.

I-AOI inizia associando i data points con aree bersaglio: etichetta i punti nell'area bersaglio come punti di fissazione relativi a quel bersaglio, mentre vengono definiti come saccadi tutti i punti all'esterno delle aree di interesse. L'algoritmo, quindi unisce i punti di fissazione consecutivi, relativi allo stesso bersaglio, in gruppi di fissazione, scartando i punti di saccade. Infine, rimuove i gruppi che non soddisfano i criteri di durata, e trasforma ogni gruppo in un punto di fissazione finale.

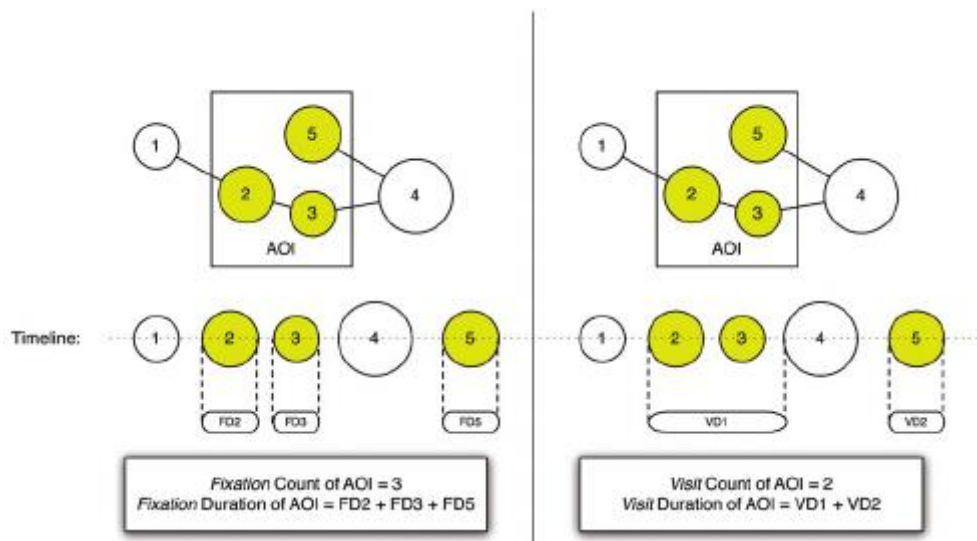


FIGURA 20: CONTEGGIO DELLE FISSAZIONI ALL'INTERNO DI UN AREA DI INTERESSE

Come spiegato in precedenza, I-AOI può fornire una visione più ampia rispetto alla sola identificazione delle fissazioni. Come queste, il dwell time all'interno delle aree ha un tempo di inizio ed un tempo di fine. Comunque, visto che le fissazioni possono anche fare da input per la determinazione delle AOIs, il tempo tra questi dwell time non descrive il comportamento delle saccadi. Invece, potrebbero esserci molteplici saccadi e fissazioni all'esterno delle aree di interesse. Perciò, mentre gli algoritmi per il calcolo dei *dwell times* non sono algoritmi di identificazione delle fissazioni in senso stretto, sono utilizzabili a livello concettuale per aiutare a spiegare la localizzazione di queste ultime intorno ad un soggetto di interesse. La *figura 20* mostra una rappresentazione grafica dell'algoritmo

3.7.5 Comparazione tra gli algoritmi e valutazione

Ogni algoritmo analizzato in precedenza permette di identificare i punti di fissazione, e di distinguere tali punti da quelli di saccade, agiscono però in maniera differente l'uno dall'altro, anche se portano, teoricamente, a risultati simili. Per compararli in maniera efficace, si tiene conto delle caratteristiche e della qualità che sono presenti in tutti questi algoritmi, in particolare: velocità di interpretazione, accuratezza, robustezza, facilità di implementazione e settaggio dei parametri. La comparazione è rappresentata nella *tabella 4* sottostante.

TABELLA 4: ATTRIBUTI RELATIVI AI VARI METODI

Method	Accuracy	Speed	Robustness	Impl. Ease	Parameters
Velocity Threshold (I-VT)	√	√√	×	√√	1
Hidden Markov Model (I-HMM)	√√	√	√√	√/× ^a	8/0 ^a
Dispersion Threshold (I-DT)	√√	√	√√	√	2
Minimum Spanning Tree (I-MST)	√	×	√√	×	2
Area-of-Interest (I-AOI)	×	√	√	√	1+ ^b

Metodi basati sulla velocità

I-VT è veloce da implementare, è molto efficiente e inoltre si può facilmente usare in tempo reale. Può però facilmente riscontrare problemi riguardanti i dati vicino alla soglia fissata, a causa di rumore del dispositivo eye-tracker o dell'arrotondamento sbagliato dei dati. Questo fenomeno può sfociare nei cosiddetti "blips", ossia gruppi di fissazioni o di saccadi composti da pochi o addirittura da un unico punto. Il protocollo in figura (20a) mostra questo problema, siccome le fissazioni 3-6 sono interpretate come quattro fissazioni differenti, anche se intuitivamente si può constatare che le fissazioni reali in

quell'area sono al massimo due. In maniera analoga questo fenomeno si verifica con le fissazioni 11-13. Il problema si presenta in particolar modo quando si utilizzano dati time-averaged, come nel caso in figura. Il problema può essere aggirato raggruppando le fissazioni vicine in "sguardi" su un determinato bersaglio.

I-HMM utilizza un modello probabilistico, e quindi utilizza le informazioni sequenziali del protocollo. Perciò, questo algoritmo permette più libertà nell'identificazione dei punti e fornisce un'analisi più robusta ed affidabile rispetto a I-VT, specialmente in presenza di rumori degli apparecchi. La figura (20c) utilizza lo stesso protocollo di dati dell'analisi fatta nel paragrafo precedente, però si può notare che i problemi relativi all'utilizzo dell'algoritmo I-VT sono stati risolti, raggruppando i dati in maniera più plausibile. Un altro beneficio di questo algoritmo è che l'HMM a due stati può essere incorporato in un modello cognitivo più ampio per interpretazioni ancor più robuste dei movimenti oculari. Inoltre, anche I-HMM è in grado di analizzare i dati in tempo reale. Lo svantaggio principale di questo metodo è la difficoltà di implementazione nel caso sia necessaria una seconda stima dei dati, che rende il procedimento molto complesso. Nel caso non ci sia bisogno di una ristima dei parametri, l'algoritmo non presenta particolari difficoltà di implementazione.

Metodi basati sulla dispersione

I-DT è un algoritmo che potenzialmente permettere l'identificazione delle fissazioni in tempo reale in maniera robusta. Fornisce dei risultati analoghi a I-HMM (per quanto riguarda il protocollo analizzato in figura (20c), evitando il "blip". Lo svantaggio primario di questo algoritmo è l'utilizzo di due parametri che sono

altamente indipendenti; per cui ad esempio una bassa soglia di dispersione con una soglia di durata alta potrebbe far sì che l'algoritmo non sia in grado di identificare le fissazioni. È perciò importante il settaggio dei parametri in input, ma la scelta adeguata delle soglie permette di avere un algoritmo in grado di fornire buoni risultati, a discapito della sua semplicità.

I-MST ha la particolarità di non utilizzare informazioni sequenziali, bensì funziona per clusters. È perciò difficile fare la comparazione con gli altri algoritmi. I-MST permette il controllo dei parametri che definiscono una saccade, variando la relativa importanza dell'edge length ratio e la media/varianza dei tests per il clustering. La sua velocità è esponenziale negativa, nel senso che la velocità diminuisce esponenzialmente mano a mano che vengono aggiunti dei punti. Sono richieste analisi multiple per ogni punto dell'MST: la prima per stabilire la distribuzione dei limiti locali, la seconda per testare ogni potenziale modifica al percorso. È inoltre difficile utilizzare l'algoritmo I-MST in tempo reale, siccome il protocollo dati deve essere completo per costruire un MST. Il punto di forza di questo algoritmo risiede nel poter fornire diversi modi di caratterizzare le fissazioni, che vanno oltre alla sola localizzazione e dimensione. Infine, alcune sue caratteristiche come, ad esempio, il rapporto tra la lunghezza e ampiezza, possono fornire informazioni importanti sulla forma di tali fissazione. La profondità del branching fornisce una maniera aggiuntiva di stabilire la dimensione delle fissazioni.

Metodi basati sull'area

I-AOI funziona in maniera efficiente in tempo reale o lineare. Comunque, presenta un problema: l'inclusione di punti di saccade all'interno di fissazioni identificate. Visto che ogni punto all'interno dell'area target viene identificato come fissazione, i punti di saccade che sono adiacenti ai punti di fissazione vengono classificati come tali. Questo porta ad errori, potenzialmente importanti, sulla durata delle fissazioni trovate. L'incidenza di questo problema aumenta all'aumentare della dimensione delle aree target, e quando i dati sono soggetti ad arrotondamento. La figura (20d) mostra questi problemi, basti guardare la prima fissazione oppure la quarta per notare i problemi di riconoscimento che affliggono questo

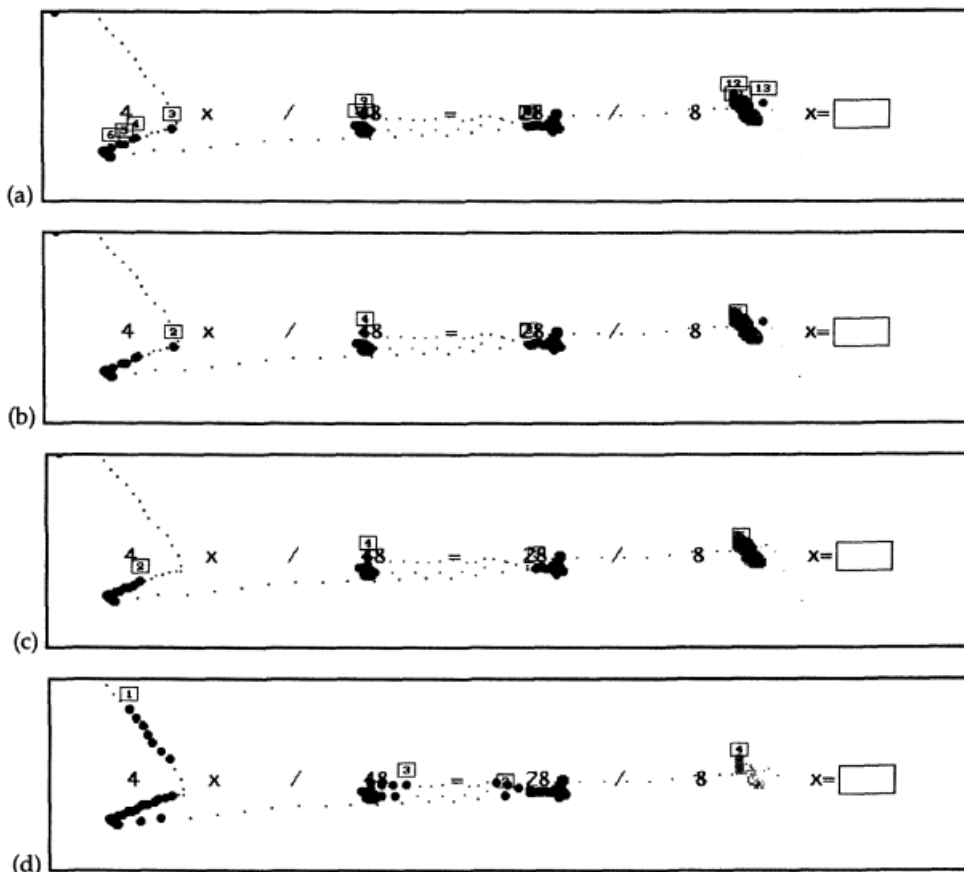


FIGURE 21: COMPARAZIONE TRA I VARI METODI

particolare algoritmo. Perciò, nonostante questo procedimento funzioni in alcuni casi particolari, non è sempre sinonimo di robustezza e affidabilità.

3.7.6 Considerazioni sugli algoritmi

I-HMM e I-DT forniscono un'identificazione delle fissazioni robusta ed accurata, incorporando informazioni sequenziali che facilitano l'interpretazione. Anche I-MST fornisce un'identificazione robusta, ma è più lento rispetto ai due algoritmi citati in precedenza. I-VT è il più semplice in assoluto, e quello che richiede meno complessità computazionale; ha il problema dei "blip", problemi nell'identificazione dei punti relativi alla soglia di velocità stabilita. I-AOI è meno performante degli altri algoritmi su tutti i fronti.

L'analisi di questi particolari algoritmi fornisce informazioni importanti sulla validità non solo di questi, ma di molti altri algoritmi dello stesso genere. Gli algoritmi basati sulla velocità e sulla dispersione sono validi, e forniscono risultati approssimativamente equivalenti tra loro. Gli algoritmi basati sull'area di interesse sono troppo restrittivi e possono generare risultati fuorvianti. Inoltre, l'uso di informazioni temporali può facilitare l'identificazione delle fissazioni. Alcuni algoritmi hanno un'adattabilità locale molto presente (I-HMM, I-DT, I-MST) e generano interpretazioni robuste anche in presenza di "rumore" delle apparecchiature.

3.8 Metriche e indicatori eye-tracking per misurare il carico cognitivo

In questa parte vengono riassunti i principali metodi di misurazione del carico cognitivo tramite la tecnologia eye-tracking. A questo punto del documento,

infatti, è necessario raggruppare tutte le informazioni raccolte, al fine di permettere una chiarezza visiva e porre le basi per quanto riguarda la comprensione delle metriche utilizzate, e soprattutto che cosa i risultati ottenuti con le metriche comportano.

3.8.1 Metriche e indicatori della cognitive task analysis

Come visto in precedenza, la Cognitive Task Analysis (CTA) è una misura che stima gli standard attesi in delle task goal-oriented, e lo scopo è quello di misurare il carico cognitivo speso per queste determinate attività. Questa analisi aiuta i ricercatori a costruire descrizioni complete dei processi cognitivi e decisionali di un soggetto. Ci sono diversi metodi per la CTA, perciò è importante scegliere quello che si adatta meglio alla situazione che si vuole analizzare. Infatti, è possibile formulare per i propri esperimenti diverse tipologie di tasks, che possono essere singole o multiple, semplici o complesse; per questo motivo è importante selezionare la metrica giusta. In ogni caso, il tempo utilizzato per completare una task e gli step effettuati sono degli indicatori del carico cognitivo. La *tabella 5* riassume questi concetti.

TABELLA 5: COGNITIVE TASK ANALYSIS

Metriche	Indicatori
Time on a task (fino al completamento)	Tempo utilizzato per completare la task è indice di carico cognitivo.
Steps to complete the task	Numero di azioni compiute per svolgere la task.

3.8.2 Metriche e indicatori per l'eye-tracking visualization

Nei dispositivi per eye-tracking attualmente in commercio, i metodi di visualizzazione standard dei dati sono la heat map e il gaze plot. La prima è la rappresentazione grafica dei dati in clusters, con i loro valori rappresentati da una scala di colori. La heat map è calcolata tramite il numero delle fissazioni e la durata di queste. La Gaze Plot map, invece, è una mappa che mostra la sequenza delle fissazioni sullo schermo, nell'ordine in cui queste hanno luogo. È quindi la rappresentazione del percorso visivo attuato dall'utente, dove i punti del grafico hanno grandezza proporzionale alla durata delle fissazioni. Queste due metriche aiutano i ricercatori a comprendere come funziona il cervello umano durante lo svolgimento di una, o di un gruppo di tasks. La *tabella 6* schematizza queste metriche.

TABELLA 6: EYE-TRACKING VISUALIZATION

Metriche	Indicatori
Heat map	Mostra il tempo totale trascorso a guardare una determinata parte dello schermo.
Gaze Plot	Più steps per completare la task significa maggior carico cognitivo.

3.8.3 Metriche e indicatori delle fissazioni

Le fissazioni rappresentano l'elemento più importante che le ricerche di eye-tracking forniscono in output, visto che sono il miglior indicatore dei processi cognitivi di una persona. Infatti, queste avvengono nel momento in cui una persona interrompe la scansione di una scena per focalizzarsi su un punto in

particolare. I punti dello sguardo sono quei punti spaziali, con coordinate (x,y) , originati dall'asse visivo e che cadono direttamente sullo stimolo visivo. Di seguito, le principali metriche (*tabella 7*):

TABELLA 7:FISSAZIONI

Metriche	Indicatori
Durata delle fissazioni	Una durata delle fissazioni estesa nel tempo indica problemi legati all'estrazione di informazioni dal contesto, oppure indica che il soggetto guardato è più attraente.
Conteggio delle fissazioni	Il numero di fissazioni in punti diversi indica l'efficienza nella ricerca delle fissazioni.
Densità spaziale delle fissazioni	Le fissazioni concentrate in un'area ridotta indicano un tipo di ricerca focalizzato ed efficiente
Fissazioni per area di interesse	Molteplici fissazioni su un'area specifica significa che questa è più percettibile, o più significativa agli occhi dell'utente.
Fissazioni on-target	È il rapporto tra le fissazioni sul bersaglio e le fissazioni totali. Un rapporto basso di valore indica una bassa efficienza nella ricerca visiva.
Tempo alla prima fissazione on-target	Tempo alla prima fissazione sul bersaglio, minore è il tempo maggiore è l'attrattività visiva dell'area selezionata come target.
Conteggio/durata media delle fissazioni per target	Il conteggio medio delle fissazioni all'interno di una determinata area di interesse, con annessa durata media di ciascuna.

Densità delle fissazioni	È il numero dei punti di sguardo all'interno di un evento di fissazione, prendendo in considerazione una piccola area al fine di distinguere tutte le fissazioni possibili.
Fixation Rate	La frequenza di osservazione di un tale punto per ogni secondo.
Dwell time	Tempo speso nella stessa area e posizione.
Gaze	Somma di tutta la durata delle fissazioni all'interno di un'area specifica. Viene utilizzato per valutare la distribuzione dell'attenzione attraverso i bersagli.
Gaze samples	Una serie di punti di sguardo vicini tra di loro a livello spaziale e temporale indicano un periodo in cui gli occhi sono bloccati verso una determinata area.
Attention Switching Frequency	Misura la dinamica dell'attenzione visiva usando il numero totale di cambi di sguardo tra le diverse aree di interesse, per minuto.

I punti del protocollo indicano dove l'utente sta guardando, e la quantità di questi varia in base alla frequenza con la quale i dati vengono raccolti dalla strumentazione, ossia il sampling rate. Se i punti sono molto vicini nel tempo e nello spazio, allora si capisce che l'utente sta guardando un determinato soggetto e questa è una misura eccellente per misurare l'attenzione visiva. La direzione dello sguardo, invece, è l'indicatore per gli elementi di un'interfaccia utilizzata per l'attività cognitiva corrente.

Per citare alcune applicazioni sul campo, nelle tasks relative alla ricerca su una pagina web, un numero di fissazioni maggiori su una determinata area significano che il soggetto è più attrattivo rispetto al contesto, oppure è più complesso (Jacob & Karn, 2003; Just & Carpenter, 1976). Nel caso di tasks di ricerca, un numero maggiore di fissazioni singole rappresenta un aumento di incertezza (Jacob & Karn, 2003). In maniera simile, la durata delle fissazioni è collegata al tempo di elaborazione delle informazioni relativo al target fissato (Just & Carpenter, 1976).

3.8.4 Metriche e indicatori per le saccadi

Come ampiamente discusso in questo documento, le saccadi sono i movimenti della fovea che dividono le varie fissazioni, e possono essere sia volontarie che involontarie. La durata di una saccade e la sua ampiezza sono associate sequenzialmente. Quando l'occhio si muove da una fissazione ad un'altra impiega tipicamente tra i 30 e gli 80 ms, e la velocità e l'ampiezza delle saccadi sono indicatori del carico cognitivo. Più alto è il carico, più lunga è la saccade (Victor Manuel, Victor M. García-Barrios, Christian Gütl, Alexandra Preis, Keith Andrews, Maja Pivec, Felix Mödritscher & Christian Trummer, 2004). Durante una saccade non avviene la codifica delle informazioni, ma le saccadi regressive (quanto si ritorna a fissare un punto dopo essere passati oltre) forniscono un importantissimo scorcio sulla difficoltà del processo. La *tabella 8* mostra le metriche e gli indicatori riguardanti le saccadi.

TABELLA 8: SACCADI

Metriche	Indicatori
Ampiezza di una saccade	Indica l'attenzione visiva e la rilevanza cognitiva.
Numero di saccadi	Numero di rapidi movimenti di entrambi gli occhi tra un punto ed un altro.
Ampiezza delle saccadi	La distanza percorsa tra il punto di inizio e il punto di fine della saccade. Saccadi più ampie indicano un'analisi più scrupolosa.
Regressione saccadica	Eventi in cui il punto focale della fovea torna nella posizione precedente. Le regressioni indicano la minore presenza di punti salienti.
Durata di una saccade	Saccadi più rapide indicano una ricerca più frenetica.

3.8.5 Metriche e indicatori dello scanpath

Lo scanpath (percorso di scansione) è un indicatore che analizza la disposizione spaziale dei movimenti oculari effettuati dai partecipanti durante una task. Scomponendo l'attenzione visiva indicando il contesto visivo in cui questa ha luogo. Il metodo principale per la visualizzazione di questo metodo è l'utilizzo di un grafico costituito da punti e linee, che rappresentano rispettivamente fissazioni e saccadi, ma ci sono diversi algoritmi per la costruzione di questi percorsi, come

ad esempio lo Scanpath Trend Analysis (STA). Nella *tabella 9* sono visualizzate le metriche e gli indicatori per lo scanpath.

TABELLA 9: SCANPATH

Metriche	Indicatori
Scanpath duration	Durata di un'intera sequenza di fissazioni e delle saccadi che le collegano. Uno scanpath con durata più estesa nel tempo indica meno effettività.
Ampiezza dello scanpath	Uno scanpath più ampio indica meno efficienza nella ricerca.
Densità spaziale	Minore densità spaziale indica una ricerca più diretta.
Direzione dello scanpath	Il percorso che ordina le fissazioni e le saccadi; indicatore della strategia di ricerca dell'utente.
Regolarità dello scanpath	Deviazioni dal percorso normale indicano problemi legati all'interfaccia.
Rapporto saccadi/fissazioni	Rapporto tra il tempo speso cercando (saccadi) e quello speso elaborando gli input visivi (fissazioni). Un rapporto più alto indica più elaborazione e meno ricerca.

3.8.6 Metriche e indicatori per la dilatazione pupillare

La dilatazione della pupilla, come ampiamente discusso, è un indicatore significativo del carico cognitivo misurabile tramite dispositivi eye-tracking. È riconosciuto che la dilatazione pupillare indichi un processo cognitivo in atto; il diametro aumenta con l'aumentare della difficoltà della task, e quindi dello stress mentale. Oltre al MWL (e ovviamente alle condizioni di luminosità), le pupille si dilatano a causa delle emozioni.

Quando un utente esegue una task, le pupille si dilatano con una risposta di 1-2 secondi, e si restringono gradualmente ad attività terminata (Kahneman& Beatty, 1966; Hess, 1972). La *tabella 10* sottostante esprime questo concetto.

TABELLA 10: DILATAZIONE PUPILLARE

Metriche	Indicatori
Dimensione pupillare	Il diametro della pupilla in risposta ad uno stimolo. La dimensione può essere usata come manifestazione del carico cognitivo. d (Marshall, 2000; Pomplun&Sunkara, 2003). È un riflesso involontario e il diametro può variare tra 1.5 mm e 8mm.

3.8.7 Metriche e indicatori dei battiti delle palpebre

I "blinks" possono fornire importanti informazioni sul carico di lavoro di un utente. È un atto involontario, che causa dati illeggibili nel caso in cui si utilizzi una delle metriche che abbiamo analizzato in precedenza.

TABELLA 11: BLINKS

Metriche	Indicatori
Blink rate	La frequenza dei battiti al minuto. Il blink rate e la dimensione della pupilla possono essere classificate come indicatori validi del carico cognitivo.
Blink duration	Durata di un battito in ms. fornisce indicazioni sul carico mentale e l'attenzione generale del soggetto.
Blinking velocity	Velocità delle palpebre quando si chiudono e si aprono.
Blink latency	Corrisponde al tempo trascorso tra il battito e una saccade.

Il blink rate e la latenza forniscono informazioni per comprendere in maniera più approfondita lo stato di attenzione del partecipante: un blink rate alto (oppure basso) indica un altro sforzo mentale (Siyuan Chen, Julien Epps, Natalie Ruiz & Fang Chen, 2011). In maniera analoga, un aumento oppure una diminuzione della velocità dei battiti, associata con un'apertura delle palpebre minore, indica stanchezza. La *tabella 11* mostra le principali metriche relative ai *blinks*.

Capitolo 4

Applicazioni dell'eye-tracking nell'ambito manifatturiero

4.1 Introduzione

Fornire prodotti personalizzati e di alta qualità a un prezzo ragionevole è fondamentale per le aziende manifatturiere per rimanere competitive nell'ambiente di oggi. Due funzionalità essenziali necessarie per soddisfare le esigenze dei clienti sono la flessibilità produttiva e l'efficienza logistica (Tracey, 1998). I produttori che non costruiscono e sfruttano strategicamente queste capacità (ad esempio, mediante misure di riduzione dei costi o di miglioramento dei processi) potrebbero perdere il loro vantaggio competitivo. La *tabella 12* schematizza le principali applicazioni dell'eye-tracking in ambito manifatturiero.

Anche se i produttori hanno costantemente aumentato il grado di automazione dei loro processi di produzione e logistica per ridurre i costi, il crescente livello di personalizzazione del prodotto e l'accorciamento dei cicli di vita del prodotto spesso rendono difficile riscattare gli investimenti richiesti dai sistemi completamente automatizzati (Romero et al., 2020). Inoltre, alcune operazioni sono intrinsecamente difficili da automatizzare, ad esempio i processi di assemblaggio o la manutenzione di attrezzature complesse personalizzate, in cui le capacità sensomotorie dei lavoratori umani che le macchine non possono imitare portano a vantaggi in termini di prestazioni (Neumann et al., 2021).

TABELLA 12:APPLICAZIONI E BENEFICI DELLA TECNOLOGIA EYE-TRACKING

Applicazioni nell'area manifatturiera e logistica				
Tecnologia eye-tracking	Sviluppo del prodotto	Produzione	Controllo qualità	Logistica
		-Interpretare la percezione del prodotto da parte del cliente. -Migliorare il processo di design.	-Analisi del lavoro e indirizzamento nelle tasks. -Valutazione del carico cognitivo. -Facilitare la collaborazione uomo-macchina.	-Controllare i procedimenti di ispezione. -Training nel controllo qualità.

Benefits		
Performance di processo.	Performance umana.	Sicurezza sul posto di lavoro.

Quindi, diverse compagnie si affidano ancora a un grande ammontare di lavoro manuale, in particolare quando si parla di aziende che si occupano di lavorazione di materiali e assemblaggio y (Sgarbossa et al., 2020). Nell'ultimo decennio, il modo in cui gli esseri umani sono coinvolti e interagiscono con

l'ambiente di produzione e logistica è cambiato a seguito dell'Industria 4.0, che è caratterizzata da una rete intelligente di esseri umani, macchine e processi con l'aiuto di tecnologie dell'informazione e della comunicazione, come i sistemi cyber-fisici, l'internet delle cose, l'analisi dei big data o sistemi basati su cloud (Kagermann et al., 2013; Neumann et al., 2021; Raut et al., 2020). I sistemi di produzione e logistica sono sistemi sociotecnici che accoppiano esseri umani e tecnologie per soddisfare le esigenze di produttività del sistema e le esigenze socio-psicologiche degli individui coinvolti (Blumberg & Alber, 1982; Sgarbossa et al., 2020). Migliorare la compatibilità uomo-tecnologia nei sistemi sociotecnici consente agli individui di godere di una maggiore responsabilità e migliora il loro sviluppo personale, che, a sua volta, migliora le prestazioni del sistema (Neumann et al., 2021). In effetti, liberare i lavoratori dalle attività di routine e consentire loro di concentrarsi su attività creative e a valore aggiunto all'interno di un sistema sociotecnico è la chiave per l'implementazione di successo dell'Industria 4.0 (Kagermann et al., 2013; Winkelhaus et al., 2021). Utilizzare le nuove tecnologie per assistere i lavoratori e adattare i processi produttivi alle loro esigenze è anche la visione chiave dell'Industria 5.0 (Breque et al., 2021; DixonDecl'ève et al., 2022). Per garantire che i luoghi di lavoro e i processi corrispondano alle esigenze dei lavoratori, è necessario analizzare il modo in cui i lavoratori interagiscono con il loro ambiente di lavoro. Una tecnologia che può potenzialmente supportare tale analisi è ET.

Le misurazioni tradizionali della compatibilità uomo-tecnologia utilizzano, ad esempio, indicatori psico-fisiologici (ad esempio, frequenza cardiaca, elettromiografia o sforzo umano percepito) o indicatori indiretti (ad esempio, tassi di lesioni, perdite economiche o efficacia operativa). Al contrario, ET può fornire approfondimenti momento per momento sullo stato cognitivo del

soggetto durante l'esecuzione del compito in modo non intrusivo. ET cattura il movimento degli occhi e lo sguardo in risposta a uno stimolo e può migliorare la nostra comprensione di come gli esseri umani si comportano e prendono decisioni all'interno di sistemi complessi. Riflette l'attenzione visiva dell'utente, aiuta a quantificare con precisione dove, come e in quale ordine viene diretto lo sguardo e fornisce spunti per raccogliere informazioni sulle intenzioni e sullo stato mentale attuale di una persona (Pfeiffer et al., 2020).

Ricerche recenti hanno utilizzato ET per valutare e migliorare le prestazioni umane in varie aree, ad esempio studiando la consapevolezza situazionale (SA) di un soggetto nel traffico aereo o stradale (Peißl et al., 2018), indagando l'apprendimento e lo stato mentale di un soggetto durante l'allenamento (Rosch & Vogel-Walcutt, 2013) e migliorando il livello di competenza per la chirurgia clinica (Sharma et al., 2016). Nella produzione e nella logistica, ET è stato utilizzato per rilevare l'efficienza di estrazione delle informazioni in uno spazio di lavoro di produzione (Stork et al., 2007), per prevedere l'intenzione di un soggetto e le fasi successive di un compito (Bovo et al., 2020), per indicare il carico di lavoro mentale in condizioni variabili (Straeter, 2020) o per generare input per il controllo del robot in scenari di lavoro collaborativo (Paletta et al., 2019). ET può aiutare a identificare le competenze dei lavoratori (Haslgrübler et al., 2019) e le inefficienze nei processi operativi (Tuncer et al., 2020), che genera preziose informazioni sulle opzioni per migliorare le prestazioni umane e di processo.

Pochi documenti hanno cercato di esporre il funzionamento dei sistemi eye-tracking in campo manifatturiero, ma comunque nessuno di essi ha discusso in modo completo come ET può essere utilizzato nella produzione e nella logistica e quali sono le potenzialità. Perlopiù, la bibliografia riporta esperimenti mirati a

risolvere un problema specifico tramite un esperimento specifico, più che fornire una metodologia o delle informazioni applicabili in altri contesti, a meno che non ci sia molta somiglianza. Duchowski (2002) ha esaminato come l'ET può essere applicato nell'ispezione visiva e per facilitare la formazione sulla ricerca visiva. La revisione non si è limitata alla produzione, ma ha invece fornito un'ampia discussione sulle applicazioni ET, coprendo anche psicologia, marketing e informatica. Borgianni et al. (2018) hanno fornito una panoramica di come ET può essere utilizzato nella progettazione e nell'assemblaggio di ingegneria. La loro revisione ha dimostrato che ET può supportare l'esame del comportamento del progettista e la comprensione dei processi di lavoro cognitivi e che può facilitare lo sviluppo di sistemi di assistenza ai lavoratori nella produzione. La revisione non ha preso in considerazione gli aspetti logistici però.

4.2 Aree di applicazione

Un processo di creazione di valore all'interno di un'azienda manifatturiera che inizia con lo sviluppo di un prodotto, passa attraverso la produzione che trasforma materie prime e semilavorati in prodotti finiti e termina con un controllo di qualità che garantisce che i prodotti finiti soddisfino le aspettative dei clienti (cfr. Porter, 2011). Inoltre, vanno considerati i processi logistici che rendono disponibili i materiali richiesti e distribuiscono i prodotti finiti. Nelle quattro aree di applicazione che verranno considerate a breve, ET è stato utilizzato per una serie di scopi diversi. Nello sviluppo del prodotto, ET è stato utilizzato principalmente per osservare i comportamenti degli ingegneri durante la progettazione del prodotto e per interpretare la percezione del prodotto di un cliente (ad esempio, Borgianni et al., 2018; Mussgnug et al., 2014). Nella produzione, l'ET è stato utilizzato

principalmente per analizzare l'attenzione visiva dei lavoratori nell'esecuzione di un particolare compito (ad esempio, Amrouche et al., 2018) o per guidarli nel completamento del compito, misurando il carico di lavoro mentale di un lavoratore (ad esempio, Paletta et al., 2021), valutando le interfacce uomo-computer/macchina e l'interazione tra esseri umani e computer / macchine (ad esempio, Walper et al., 2020), o per facilitare la collaborazione uomo-macchina/robot (ad esempio, Berg et al., 2019). Durante l'ispezione di qualità, il monitoraggio dei movimenti oculari può essere utile per valutare le prestazioni dell'ispezione (Niemann et al., 2019) e per formare la strategia di ricerca visiva dei lavoratori. Nella logistica, ET è stato utilizzato principalmente per valutare la frequenza di interazione dei corrieri con i dispositivi di navigazione durante la consegna delle merci (van Lopik et al., 2020) o per stimare il carico di lavoro mentale del conducente del carrello elevatore durante la movimentazione dei materiali e le attività di trasporto all'interno dei magazzini (Ulutas & Ozkan, 2019). Secondo Mo (2012), Prodan et al. (2015) e Tobii Pro (2022), ET può portare a miglioramenti nelle prestazioni dei processi, nelle prestazioni umane, nell'ambiente di lavoro e nella sicurezza. Poiché ET è uno strumento prezioso per monitorare i movimenti oculari dei lavoratori e rilevare le coerenze dei processi per un'ampia varietà di attività di produzione e logistica, è importante sintetizzare i vantaggi di ET, come i miglioramenti della produttività e delle prestazioni di ispezione, al fine di creare chiarezza sull'argomento. Secondo l'ipotesi del collegamento occhio-mente, i movimenti oculari riflettono il processo di attenzione degli esseri umani (Just & Carpenter, 1976). Poiché ET consente di osservare e registrare il comportamento visivo umano durante l'adempimento dei compiti e il processo decisionale, ET può aiutare a identificare i metodi di best practice adottati dagli esseri umani e migliorare le prestazioni umane in termini

di conoscenza e miglioramento delle abilità. Gli esseri umani sono coinvolti nel loro ambiente di lavoro e interagiscono con colleghi, macchine o robot. I rischi possono verificarsi quando c'è una mancanza di consapevolezza situazionale. A questo proposito, ET può aiutare a monitorare l'attenzione visiva del lavoratore e identificare potenziali pericoli, il che aiuta a migliorare la progettazione del posto di lavoro per un ambiente di lavoro più sicuro.

4.3 Sviluppo del prodotto

4.3.1 Interpretare la percezione del prodotto da parte del consumatore

L'eye-tracking aiuta a interpretare il modo in cui i clienti percepiscono un prodotto, e risultati ottenuti dalle analisi con questi strumenti possono andare a migliorare e a snellire sensibilmente la fase di progettazione. Li et al. (2018) hanno utilizzato ET per quantificare l'interesse dei soggetti per un prodotto. I loro risultati hanno mostrato che il prodotto classificato dai clienti come il più preferibile ha ricevuto il maggior numero di fissazioni; le fissazioni potrebbero quindi essere viste come un proxy per l'interesse del cliente in un prodotto. Du e MacDonald (2014) hanno studiato se effettivamente l'utilizzo di un ET può prevedere l'importanza relativa delle caratteristiche del prodotto e se può essere utilizzato per identificare le particolari caratteristiche che un prodotto deve avere per essere notato al meglio da un consumatore. Gli autori hanno trovato correlazioni positive tra l'importanza di una caratteristica del prodotto in questione, e tre tipi di metriche fornite dai dispositivi di eye-tracking: tempo di fissazione, tempo di fissazione percentuale, conteggio delle fissazioni; una correlazione negativa,

invece, è stata trovata tra l'importanza della caratteristica e il tempo della prima fissazione. Borgianni et al. (2019) hanno studiato come i clienti percepiscono i prodotti creati da processi di produzione additiva e tradizionale. Gli autori hanno combinato un questionario di autovalutazione con ET e hanno scoperto che il questionario dovrebbe essere utilizzato per misurare l'attrattiva percepita, la qualità e la rappresentazione del prodotto, mentre ET dovrebbe essere utilizzato per valutare gli attributi di esplorazione, impatto e attenzione del prodotto. Kuo et al. (2021) hanno esplorato l'uso di ET per l'interpretazione delle emozioni degli utenti sul design di prodotto. I loro risultati mostrano che i movimenti oculari degli utenti mostrano in maniera chiara il loro pensiero riguardante il prodotto. Inoltre, l'attenzione visiva sia degli esperti che dei principianti è guidata dalla componente più attraente del prodotto. Sia Borgianni et al. (2019) che Kuo et al. (2021) hanno sostenuto che ET non dovrebbe sostituire questionari o interviste, ma invece deve essere utilizzato in parallelo per analizzare fenomeni difficili da catturare tramite questionari e tecniche di auto-valutazione. Yang et al. (2021) hanno utilizzato ET per verificare se i prodotti che presentano fattori di design emotivo influenzano il comportamento visivo dell'utente. Hanno concluso che il diametro della pupilla può essere utilizzato come indicatore dell'eccitazione emotiva dell'utente.

Oltre a interpretare la percezione di un prodotto da parte dell'utente, ET può connettere le risposte degli utenti con l'intento progettuale dei progettisti. Gli studi di Purucker et al. (2014) e Hyun et al. (2017) hanno dimostrato che la probabilità che un utente guardi un prodotto dipende da diversi elementi di progettazione e, pertanto, potenziali modifiche al design possono essere valutate con l'aiuto di ET. Yang et al. (2016) hanno utilizzato ET integrato dal riconoscimento dei gesti per indagare su come gli utenti comprendono un prodotto analizzando i

comportamenti visivi e di movimento degli utenti. Hanno concluso che la combinazione di queste due tecniche può catturare efficacemente l'intento dell'utente e guidare la progettazione del prodotto. Li et al. (2017) hanno combinato elettroencefalografia (EEG) e tecnologia ET per registrare sia l'attività cerebrale che lo sguardo. In questa impostazione, l'EEG misura il livello di eccitazione del soggetto e l'ET registra i punti di fissazione del soggetto. I risultati dello studio indicano che l'elaborazione di entrambi i tipi di dati in un modello logico fuzzy fornisce una buona stima delle preferenze di prodotto del soggetto. Secondo Wang et al. (2020), l'utilizzo dei dati raccolti da ET ed EEG può prevedere le preferenze di progettazione del prodotto dei soggetti e la combinazione di dati ET ed EEG può ottenere la migliore precisione di previsione. Inoltre, Schmitt et al. (2014) hanno dimostrato che ET e biosegnali (elettromiografia – EMG, risposta galvanica della pelle – GSR) possono indicare l'importanza degli attributi del prodotto percepiti dal cliente.

4.3.2 Analizzare il processo di design

Oltre a misurare la percezione degli attributi del prodotto da parte dell'utente, l'eye-tracking può anche fornire informazioni sui comportamenti dei lavoratori mentre sono occupati con progetti, diagrammi e linee guida per il design di produzione. Matthiesen et al. (2013) hanno utilizzato ET per rilevare i comportamenti cognitivi degli ingegneri mentre costruiscono una comprensione funzionale di un sistema tecnico con diverse rappresentazioni (disegni 2D o 3D o l'oggetto fisico). I loro risultati mostrano che i dati dello sguardo possono fornire informazioni che non possono essere catturate da dati audio e video, integrando così altri metodi empirici (ad esempio, analisi di documenti, interviste o analisi di

protocollo). ET è stato anche trovato per essere meno invadente di altri metodi empirici. Nambiar et al. (2013) hanno utilizzato ET accoppiato con un protocollo retrospettivo think-aloud per analizzare le strategie di visualizzazione adottate dagli esperti durante la lettura di progetti di parti meccaniche. Gli autori hanno basato la loro analisi sulla teoria dei dati/frame per elencare le attività concrete degli esperti e identificare le priorità dei compiti. I risultati sono stati utilizzati per formulare una mappa cognitiva che descrive il processo di lettura del progetto dell'esperto, che facilita l'allenamento dei principianti. Nelius et al. (2020) hanno usato ET per indagare su come i progettisti sono influenzati dal bias di conferma (cioè la tendenza a cercare e interpretare le informazioni in un modo che corrisponde alla propria visione). Hanno scoperto che il bias di conferma è associato a un breve tempo di fissazione e che ha un impatto negativo sul ragionamento durante l'analisi nella progettazione ingegneristica.

Maier et al. (2014) hanno utilizzato ET per indagare se il layout UML (Unified Modeling Language) ha un impatto sulla comprensione dei diagrammi UML. Hanno scoperto che rispetto alle misurazioni oggettive (tempo, accuratezza) e alle valutazioni soggettive (difficoltà, sforzo), le misure ET non possono indicare chiaramente che una grande dimensione del diagramma, o una bassa qualità dello stesso, portano a basse prestazioni e/o ad un alto carico cognitivo nella comprensione del diagramma. Gli autori hanno sostenuto, tuttavia, che la comprensione del diagramma coinvolge vari processi mentali che richiedono ulteriori ricerche per migliorare il potere predittivo delle analisi ET. Boa e Hicks (2016) hanno esplorato il processo di operazione delle informazioni (ricerca, familiarizzazione, comprensione, critica della revisione e selezione della revisione) degli ingegneri tramite ET misurando il rapporto tra l'ampiezza della saccadi e la durata delle fissazioni (rapporto SF). I loro risultati hanno mostrato

che la distribuzione complessiva del rapporto SF per i singoli processi di raccolta delle informazioni è superiore a quella dell'attività di lettura di base, il che implica una maggiore elaborazione per i processi informativi. Hanno anche scoperto che il rapporto SF dipende dagli stimoli nella scena (informazioni simboliche o iconiche), in cui l'interazione delle informazioni iconiche è più allineata con l'elaborazione ambientale mentre l'interazione delle informazioni simboliche è più allineata con l'elaborazione focale.

Per indagare l'interazione tra i soggetti e le linee guida per la progettazione della produzione, Doellken et al. (2021) hanno introdotto "l'entropia dello sguardo" per indicare quanto sia "disordinato" il comportamento visivo di un soggetto. I loro risultati hanno mostrato che ingegneri e studenti dimostrano comportamenti visivi diversi. Gli ingegneri ad alte prestazioni tendono a focalizzare la loro attenzione visiva con un comportamento meno mutevole, mentre gli studenti ad alte prestazioni hanno mostrato un comportamento più esplorativo. Mehta et al. (2020) hanno, infine, utilizzato ET per comprendere i processi cognitivi dei progettisti durante la riprogettazione per la produzione additiva (AM). I loro risultati hanno mostrato che i progettisti ad alte prestazioni dedicano molto più tempo alle attività di progettazione indiretta, come l'analisi delle sollecitazioni, rispetto ai progettisti a basso rendimento.

4.4 Produzione

4.4.1 Analisi del lavoro e guida alle tasks

Rispetto al tradizionale riconoscimento delle attività umane tramite telecamere, ET consente un monitoraggio più preciso dell'attenzione umana. In produzione, ET

può essere utilizzato per monitorare la qualità dell'esecuzione delle attività e per valutare le competenze e le prestazioni dei lavoratori. Bhatia et al. (2015) hanno esplorato la relazione tra distanza visiva e prestazioni di compiti umani per un compito di precisione manuale. Hanno osservato che nella postura eretta, il partecipante visualizza l'intero spazio di lavoro in uno stretto campo visivo e, di conseguenza, la stima visiva della posizione target e della traiettoria della mano diventa più veloce. I loro risultati implicano che all'interno di un intervallo consentito di distanze visive, maggiore è la distanza di lavoro visiva, più veloce è il tempo di completamento dell'attività con meno fissazioni oculari dell'attività. Shotton e Kim (2021) hanno utilizzato ET per valutare i livelli di attenzione dei lavoratori durante le attività di assemblaggio e hanno scoperto che il livello di attenzione può influenzare le fissazioni visive dei compiti dei lavoratori. Amrouche et al. (2018) hanno utilizzato ET per catturare i cambiamenti nell'attenzione visiva dei lavoratori in tempo reale e per mapparla all'esecuzione di attività di assemblaggio industriale semi-manuale. Gli autori hanno scoperto che il cambiamento dell'indice NNI (Nearest Neighbor Index) è correlato alla commutazione delle attività e hanno concluso che i valori NNI possono essere utilizzati per rilevare l'insorgenza e la compensazione delle attività. Haslgrübler et al. (2019) hanno studiato la relazione tra la coordinazione occhio-mano e le capacità motorie necessarie per completare un compito. Hanno concluso che i modelli di coordinazione occhio-mano sono correlati con il set di abilità richiesto per completare l'attività, e che la coordinazione occhio-mano può quindi essere utilizzata per spiegare la precisione del movimento durante il completamento dell'attività. Manns et al. (2021) hanno proposto un sistema di motion capture che combina ET con il movimento del corpo e il tracciamento delle mani per identificare le attività del lavoratore e prevedere le azioni durante l'assemblaggio

manuale. Bovo et al. (2020) hanno studiato l'uso dei soli segnali manuali, solo dei segnali dello sguardo e dei segnali congiunti della mano e dello sguardo per tracciare le attività lavorative e per dedurre l'intenzione del lavoratore. I loro risultati hanno mostrato che i dati combinati di mano e sguardo portano alle migliori prestazioni nell'inferire l'intenzione del lavoratore, mentre i dati manuali portano solo a migliori prestazioni nel monitoraggio delle attività lavorative.

Bovo et al. (2020) hanno anche dimostrato che gli errori di previsione possono essere ridotti se il tracciamento delle mani e dello sguardo è completato dalla realtà aumentata (AR). ET può infatti essere combinato con l'AR per supportare le attività di produzione (Sausman et al., 2012), ad esempio, per catturare l'attenzione dell'utente e confrontarla con scenari operativi tipici per identificare possibili lacune nella percezione dello spettatore e guidare l'utente attraverso l'AR (Ivaschenko et al., 2018). Renner e Pfeiffer (2017) hanno confrontato una nuova tecnica di wave guidance sferica basata su AR, come la arrow guidance, l'attention funnel guidance e la visualizzazione stazionaria di un'immagine sullo schermo. Il loro obiettivo era quello di scoprire quale tecnica di guida porta alle migliori prestazioni del compito in un ambiente di realtà virtuale (VR), in cui ET è stato incorporato in un dispositivo AR per monitorare la direzione dello sguardo del partecipante e modulare il suo feedback di conseguenza. I loro risultati mostrano che dotare un dispositivo AR di ET può ridurre leggermente i movimenti della testa e il tempo di completamento delle attività, e che ET è particolarmente utile quando lo sguardo del partecipante è al di fuori del display AR.

Il riconoscimento delle attività tramite ET facilita anche il training del personale. Se un sistema basato su ET è in grado di identificare le diverse fasi di un'attività di assemblaggio, ad esempio, il sistema può fornire supervisione rispetto

all'esecuzione corretta o errata dell'attività (Amrouche et al., 2018; Bovo et al., 2020). Dato che i modelli di coordinazione occhio-mano possono spiegare la precisione del movimento durante l'esecuzione delle attività, ET può supportare in modo efficiente l'allenamento sul posto di lavoro e aiutare a identificare un punto nel tempo in cui il principiante mostra una prestazione coerente per indicare il completamento della formazione (Haslgrübler et al., 2019). Un altro tentativo di adottare ET per la formazione dei principianti in un contesto di assemblaggio è stato fatto da Haslgrübler et al. (2018), che hanno esplorato come i diversi formati video didattici influiscono sull'efficienza della formazione. Gli autori, tuttavia, non hanno trovato prove chiare che i video didattici con annotazioni dello sguardo siano migliori dei video in prima persona e in terza persona.

4.4.2 Valutare il carico cognitivo

Il carico di lavoro mentale riflette la tensione mentale su un lavoratore che deriva dall'esecuzione di un compito in specifiche condizioni ambientali e operative (Cain, 2004). Misurare il carico di lavoro mentale è impegnativo in situazioni di lavoro reali, poiché le misure tradizionali (come la NASA-TLX) sono soggettive e spesso troppo invadenti. ET, a questo proposito, fornisce un'opzione non invasiva per raccogliere informazioni attentive e misurare il carico di lavoro mentale. Nandakumar et al. (2014), ad esempio, hanno proposto un metodo basato su ET combinato con il toolbox wavelet MATLAB per stimare il carico di lavoro cognitivo e hanno confrontato questa misura con l'Indice di attività cognitiva. I loro risultati hanno mostrato che un diametro della pupilla più grande indica un carico di lavoro mentale più elevato. Gli autori hanno suggerito di monitorare lo stato dei

lavoratori in tempo reale per tracciare il loro livello di prontezza mentale e garantire operazioni sicure nello stabilimento. Straeter (2020) ha combinato ET con il test di sonnolenza grafica della pupilla (PST) per rilevare l'affaticamento mentale nelle attività di produzione monotone e ripetitive. Hanno osservato che l'affaticamento mentale, misurato valutando la varianza del diametro della pupilla, è correlato all'effetto monotonia.

Paletta et al. (2021) hanno presentato un nuovo metodo per misurare sia il carico cognitivo che lo sforzo biomeccanico. Il loro metodo utilizza ET per analizzare i movimenti oculari durante l'esecuzione delle attività e sensori indossabili per analizzare i modelli sensomotori dei lavoratori. Invece di analizzare il diametro della pupilla, hanno sviluppato un indicatore di concentrazione euristica utilizzando dati sulle regioni di interesse con riferimento allo sguardo per stimare il carico di lavoro mentale. Hanno concluso che lavorare continuamente per più di 20-30 minuti con alta concentrazione aumenta l'affaticamento mentale, che, a sua volta, intensifica i fattori di rischio sul lavoro. Peruzzini et al. (2017) e Peruzzini et al. (2020) hanno proposto un nuovo protocollo che incorpora ET, sensori indossabili multi parametrici (frequenza cardiaca, frequenza respiratoria, temperatura della pelle, angolo di postura), una videocamera, modellazione digitale e un questionario soggettivo per valutare l'ergonomia fisica e il carico di lavoro mentale dei lavoratori. Gli autori hanno suggerito di utilizzare misure biometriche ed ET insieme al questionario NASA-TLX per valutare il carico di lavoro mentale.

Van Acker et al. (2021) hanno infine esplorato cambiamenti concreti nelle condotte di assemblaggio come indicatori per le variazioni del carico di lavoro mentale osservando e analizzando i video ET registrati. Gli autori hanno

sviluppato uno schema di codifica per la condotta di assemblaggio e lo hanno testato in situazioni ad alta e bassa complessità. Hanno scoperto che comportamenti come "raccolta di parti", "posizionamento", "rotazione delle parti", "tentativo di posizionamento" e "congelamento" erano significativamente più frequenti durante l'esecuzione di attività di assemblaggio altamente complesse, rispetto alle attività a basso complessità, rivelando un elevato carico di lavoro mentale.

4.4.3 Quantificare la complessità delle interfacce e delle operazioni uomo/macchina

Gli esseri umani e le macchine possono comunicare tra loro tramite varie interfacce utente, tra cui display visivi, gesti delle mani e del viso, audio vocale e non vocale per avvisi e interazione fisica e tattile (Goodrich & Schultz, 2007). ET, a questo proposito, offre l'opportunità di valutare l'usabilità dell'interfaccia uomo-computer/macchina per migliorare l'ergonomia della comunicazione. Zülch e Stowasser (2003) hanno utilizzato ET per esplorare le strategie visive adottate dai soggetti durante la loro interazione con il software di pianificazione dell'officina e hanno studiato le relazioni tra le diverse forme di rappresentazione dei dati (ad esempio, la codifica alfanumerica vs simbolica) e i modelli di interpretazione dei dati dei soggetti. I loro risultati mostrano che ET può identificare la strategia visiva di un soggetto e rilevare le preferenze del soggetto per quanto riguarda le diverse forme di rappresentazione dei dati, il che facilita un design dell'interfaccia user-friendly.

Utilizzando ET combinato con un questionario, Wu et al. (2016) hanno scoperto che la complessità delle interfacce LED utilizzate nella produzione influisce in

modo significativo sull'attenzione visiva e sui sentimenti degli utenti. Gli autori hanno concluso che ET combinato con un questionario può aiutare a valutare efficacemente l'usabilità di un'interfaccia uomo-macchina. Wu et al. (2016) e Walper et al. (2020) hanno utilizzato ET per indagare l'effetto dell'esperienza utente sull'interazione dell'utente con diversi progetti di interfaccia. Wu et al. (2016) hanno dimostrato che quando la complessità dell'interfaccia aumenta, gli utenti inesperti diventano meno efficienti nella ricerca di informazioni. Walper et al. (2020) hanno scoperto che gli utenti esperti dedicano meno tempo a lavorare con un'interfaccia e dedicano più tempo all'elaborazione delle attività fuori dallo schermo. Zhang et al. (2017) hanno utilizzato ET per valutare e migliorare le proprietà di progettazione di un'interfaccia per macchine utensili CNC. Analizzando il comportamento visivo dell'utente, hanno sviluppato un'interfaccia user-friendly che migliora l'esperienza interattiva dei lavoratori.

Oltre a valutare l'usabilità delle interfacce uomo-computer/macchina, ET è stato anche applicato nella valutazione dell'efficacia delle informazioni istruttive nella produzione. Lusic et al. (2016) hanno confrontato l'influenza delle istruzioni statiche (basate su immagini) e dinamiche (animate) per le attività di assemblaggio manuale e hanno utilizzato ET per catturare la visione reale dei lavoratori durante la loro interazione con il mezzo che fornisce le informazioni e con gli oggetti di assemblaggio. Hanno scoperto che i lavoratori completano le attività di assemblaggio più velocemente con una frequenza di ricerca inferiore quando vengono fornite istruzioni dinamiche. Heinz et al. (2020) hanno utilizzato ET per analizzare come gli utenti accedono alle istruzioni di assemblaggio mostrate su un sistema assistivo basato sulla proiezione digitale, e hanno scoperto che gli utenti tendono ad avere sequenze di visualizzazione non lineari inferiori in un'attività di assemblaggio ripetuta e che esistono effetti di

apprendimento nell'uso del sistema assistivo. Tang et al. (2019) hanno studiato una soluzione di segnalazione robotizzata all'interno di un sistema di assemblaggio collaborativo uomo-robot. Hanno proposto il concetto di Robot Light Skin (RLS) come sistema di indicazione visiva che comunica lo stato del robot ai lavoratori. Utilizzando ET e interviste semi-strutturate, hanno dimostrato che il concetto RLS funziona meglio di una tradizionale soluzione tower light, poiché i lavoratori hanno meno fissazioni sull'RLS rispetto al sistema tradizionale durante il loro compito di assemblaggio. I lavoratori hanno anche dimostrato di reagire più velocemente e di eseguire più compiti quando è stato adottato il concetto RLS.

Altri lavori hanno studiato il ruolo di ET nel controllo visivo interattivo nella produzione. Bardins et al. (2008) hanno combinato ET e head tracking per consentire il controllo di un'interfaccia di lavoro tramite lo sguardo. Hanno anche condotto studi di usabilità e confermato che l'utente può interagire con l'interfaccia grafica, in modo rapido e intuitivo, senza essere distratto dallo svolgere la task. Jungwirth et al. (2018) hanno confrontato un approccio ET con operazioni manuali fisiche per il controllo interattivo remoto dei dispositivi durante il completamento delle attività. I loro risultati hanno mostrato che l'approccio basato sullo sguardo ha un vantaggio nel controllare i dispositivi distanti e che il controllo fisico funziona meglio in caso di brevi distanze. Gli autori hanno anche concluso che il controllo interattivo basato sullo sguardo è particolarmente utile per i lavoratori nella regolazione delle impostazioni della macchina quando le loro mani sono occupate.

Guo et al. (2013) hanno sviluppato un prototipo per aiutare l'utente a compiere delle operazioni di assemblaggio in un ambiente di virtuale. Un tentativo simile è

stato fatto da Zhao et al. (2021), che hanno utilizzato l'ET e i dati di tracciamento delle mani come input per il controllo del movimento dei robot in un ambiente di assemblaggio virtuale, attraverso un'interfaccia computerizzata. Gli autori hanno inoltre confrontato la modalità di interazione occhio-mano con un touch screen e hanno scoperto che il controllo occhio-mano porta a tempi di completamento delle attività di assemblaggio più brevi rispetto all'interazione tradizionale. Li et al. (2021) hanno anche illustrato la possibilità di utilizzare ET per il controllo visivo interattivo. Hanno proposto un framework di interazione uomo-computer che contiene un'attività di riconoscimento del target, consentendo l'interazione con il sistema di presa robotico guardando direttamente l'oggetto di interesse.

4.4.4 Facilitare i sistemi uomo/robot

L'eye-tracking consente inoltre una collaborazione senza soluzione di continuità tra esseri umani e macchine/robot, in particolare in termini di interpretazione dell'intenzione umana e miglioramento della SA dei lavoratori in un ambiente di lavoro collaborativo. Secondo Palinko et al. (2016), lo sguardo oculare da solo trasporta informazioni sufficienti per consentire al robot di interpretare l'intenzione umana. Gli autori hanno sviluppato un sistema ET che traccia la posizione dello sguardo in base a una stima dell'orientamento della testa e dei movimenti oculari. I loro risultati mostrano che l'utilizzo di questa tecnologia consente ai robot di completare l'attività con un tasso di successo più elevato e con un tempo di completamento inferiore rispetto all'utilizzo del solo tracciamento di posizione della testa. Una valutazione basata su questionari, in seguito, ha suggerito che i partecipanti preferiscono il sistema ET quando interagiscono con i macchinari durante un compito collaborativo.

Admoni e Srinivasa (2016) hanno sostenuto che l'eye-tracking fornisce un ulteriore segnale implicito per aiutare a prevedere gli obiettivi dell'utente. Hanno proposto un approccio che integra lo sguardo oculare in un modello di processo decisionale di Markov, basato sull'idea che lo sguardo è focalizzato sul compito da svolgere prima ancora che la mano inizi a muoversi verso di esso. L'approccio proposto è stato convalidato in un esperimento iniziale, dimostrando che l'interazione basata sullo sguardo ha un grande potenziale in uno scenario di interazione di autonomia condivisa. Fan et al. (2020) hanno proposto un nuovo approccio che prende in considerazione il segnale dello sguardo e le informazioni spaziali come input per il controllo degli arti robotici soprannumerari (SRL). I loro risultati mostrano che le operazioni SRL controllate dallo sguardo possono aiutare i lavoratori senza interrompere il processo di lavoro corrente, e che la soluzione SRL richiede solo 0,2 s per essere eseguita dopo che il lavoratore fissa l'attività. Berg et al. (2019) hanno studiato l'interazione tra gli esseri umani e un robot mobile industriale basato su gesti umani e movimenti oculari. Le informazioni di uscita sono state visualizzate utilizzando un proiettore tascabile. I loro risultati dimostrano la fattibilità dell'utilizzo di input intuitivi (sguardo oculare e gesti) per stabilire una comunicazione reciproca tra esseri umani e robot.

TABELLA 13: AREE DI APPLICAZIONE E UTILIZZO DELL'EYE-TRACKING

Area di applicazione in ambito manifatturiero e logistico	Utilizzo dell'eye-tracking	Misure ET preferibili
Sviluppo del prodotto	Interpretare le preferenze del consumatore	Durata e numero delle fissazioni, tempo alla prima fissazione, posizione della prima fissazione

	Osservare il processo di design	Durata delle fissazioni, SF ratio, entropia dello sguardo
	<i>Work analysis e task guidance</i>	Posizione delle fissazioni
Produzione	Valutare il mental workload	Diametro Pupillare
	Analizzare interfacce e interazioni uomo/macchina	TFF, durata e posizione delle fissazioni, dwell time
Controllo qualità	Osservare patterns di controllo qualità	Posizione e durata delle fissazioni, scanpath
	Training del personale per il CQ.	Posizione e durata delle fissazioni, scanpath
Logistica	Controllo magazzino e distribuzione.	Numero e durata delle fissazioni.

Oltre ai robot di controllo, ET può anche essere utilizzato per valutare la SA, che comporta una comprensione situazionale e una proiezione degli stati futuri del sistema alla luce degli obiettivi pertinenti del lavoratore come base per il processo decisionale (Endsley, 1995; Lundberg, 2015). Paletta et al. (2017) hanno

proposto un nuovo approccio che combina ET e motion tracking per stimare la SA nell'interazione uomo-robot. Gli autori hanno sviluppato una misura probabilistica della distanza tra lo sguardo del lavoratore e il target, e hanno introdotto il 3D-NNI per studiare la distribuzione visiva dell'utente rispetto agli oggetti di interesse. Hanno confrontato l'approccio ET con i tradizionali metodi di misurazione SA, come la Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) e la Situational Awareness Rating Technique (SART), e hanno confermato che una stima della SA basata sull'eye-tracking è correlata ai risultati SAGAT e SART. Pertanto, misurare lo sguardo del lavoratore attraverso ET può servire come solida base per prevedere la consapevolezza situazionale di un soggetto. (Dini et al., 2017; Paletta et al., 2019). La *tabella 13* fornisce una visione di insieme dei concetti espressi in questo capitolo, dando delle linee guida seguibili nelle varie situazioni.

4.5 Controllo qualità

4.5.1 Trovare patterns di controllo qualità

L'ispezione visiva è importante nella produzione. Il monitoraggio dei movimenti oculari durante l'ispezione visiva consente il rilevamento di modelli di movimento oculare, che possono essere utilizzati per migliorare le prestazioni di ispezione (Duchowski, 2002). Schlosser et al. (2016) e Niemann et al. (2019) hanno combinato uno studio eye-tracking con un questionario per analizzare i modelli di ispezione visiva del lavoratore, con l'obiettivo di ottimizzare il controllo di qualità in un reparto di verniciatura nella produzione automobilistica. Gli autori hanno scoperto che i movimenti visivi effettivi dei lavoratori differivano dalle istruzioni di

lavoro fornite e che alcune parti critiche non erano fissate abbastanza a lungo per il controllo di qualità. Il questionario ha rivelato che gli occhi dei lavoratori si stancavano dopo la metà dell'orario di lavoro e che il 40% dei lavoratori non riusciva a concentrarsi sufficientemente sui propri compiti dopo cinque ore di lavoro. Sulla base di questi risultati, gli autori hanno suggerito di confrontare regolarmente i processi di lavoro effettivi con fogli di lavoro standardizzati, di adattare i processi se necessario e di migliorare le condizioni di luce nell'ambiente di lavoro.

Tuncer et al. (2020) hanno utilizzato l'eye-tracking per migliorare l'efficienza dei processi di ispezione della linea e del bilanciamento della linea di assemblaggio. Hanno sostenuto che l'ET può misurare quantitativamente le posizioni di ispezione dei lavoratori e i tempi di ispezione per ogni attività e, di conseguenza, il bilanciamento della linea di assemblaggio può essere ottimizzato eliminando le incongruenze tra il tempo di esecuzione delle attività previsto ed effettivo. Ozkan e Ulutas (2016) hanno confrontato i modelli di ispezione della qualità di principianti e lavoratori esperti nella produzione di piastrelle di ceramica utilizzando l'ET e hanno scoperto che i lavoratori esperti si fissano maggiormente sugli oggetti ispezionati rispetto ai lavoratori alle prime armi. Allo stesso modo, Ulutas et al. (2020) hanno esaminato i modelli di attenzione visiva dei principianti e dei lavoratori esperti combinando l'eye-tracking con i modelli di Markov. I loro risultati mostrano che i lavoratori esperti utilizzano una strategia di ispezione approfondita e sistematica e che sono in grado di ispezionare tutte le aree importanti predeterminate, mentre i lavoratori alle prime armi tendono a fare una visione generale dell'oggetto ispezionato e ignorano alcune aree che avrebbero dovuto essere ispezionate.

Aust et al. (2021) hanno esaminato la relazione tra la pulizia del prodotto e le prestazioni di ispezione delle pale dei motori aeronautici, in cui l'ET è stato utilizzato per identificare le strategie di ricerca adottate da gruppi di soggetti con vari livelli di competenza. I risultati mostrano che l'eye-tracking può rilevare direttamente gli errori di ricerca valutando (una mancanza di) fissazioni sull'area difettosa, ma che può rilevare errori di riconoscimento (dove la regione difettosa è fissata, ma dove non è riconosciuta come rilevante per gli ulteriori processi decisionali) solo se integrata da prove aggiuntive (ad esempio, marcatura dei difetti sull'immagine ispezionata). Hanno anche scoperto che i soggetti più esperti tendono ad effettuare una ricerca più sistematica del difetto con un tempo di ispezione inferiore, indipendentemente dalla pulizia dell'oggetto ispezionato; quando l'oggetto ispezionato è sporco, tuttavia, l'accuratezza dell'ispezione diminuisce per tutti i soggetti.

L'eye-tracking aiuta anche a rivelare i cambiamenti nell'attenzione visiva quando le vulnerabilità informatiche vengono introdotte durante l'ispezione della qualità. Huang et al. (2020) hanno combinato sensori EEG ed l'ET per rilevare l'hacking cognitivo dei lavoratori in un ambiente di ispezione di qualità assistita da computer, in cui i partecipanti sono tenuti a ispezionare la rugosità superficiale dei componenti. Alcuni numeri primi con funzione subliminale sono stati introdotti nell'interfaccia uomo-macchina per la registrazione dei dati per fuorviare l'ispezione senza essere direttamente percepibili. I risultati rivelano che i partecipanti hanno mostrato diversi comportamenti corticali e di movimento oculare durante l'analisi, in presenza degli elementi fuorvianti. L'elettroencefalogramma e l'eye-tracking sono quindi utili per rilevare l'hacking cognitivo.

4.5.2 Training di controllo qualità

Anche nell'ispezione della qualità, ET consente di migliorare le strategie di formazione. Wang et al. (1997) hanno studiato se la strategia di ricerca visiva può essere cambiata dalla formazione. Gli autori hanno utilizzato ET per monitorare i modelli di movimento oculare del soggetto e hanno addestrato tre gruppi di partecipanti con diverse strategie di ricerca (sistematica, naturale, casuale) per l'ispezione dei circuiti stampati. Hanno scoperto che attraverso il monitoraggio dei movimenti oculari dei partecipanti e fornendo feedback sulle prestazioni, le strategie di ricerca visiva dei partecipanti potrebbero essere addestrate. Duchowski et al. (2000) hanno sviluppato un simulatore VR con un eye tracker binoculare integrato nel display montato sulla testa. Il loro obiettivo era la formazione delle capacità di ispezione dei lavoratori in un ambiente virtuale immersivo. Sadasivan et al. (2005) hanno anche studiato se la strategia di ricerca può essere addestrata utilizzando un display di formazione feedforward che mostra le informazioni ET raccolte da un ispettore esperto. Hanno scoperto che ET può catturare il processo cognitivo dell'esperto durante l'ispezione riflessa nelle sequenze di ricerca scelte. I principianti possono quindi migliorare la loro efficienza di ispezione attraverso la formazione feedforward basata su scanpaths. Gli autori hanno anche utilizzato un questionario per valutare l'utilità della formazione basata su scanpaths e hanno scoperto che i partecipanti considerano la strategia di ricerca dell'esperto preziosa per migliorare le proprie prestazioni di ispezione.

Bowling (2010) ha studiato la relazione tra la quantità di informazioni feedforward (FI) fornite a un soggetto e il comportamento visivo del soggetto. Hanno testato

quattro livelli di FI (senza FI, FI relativi alla gravità del danno, FI relativi alla gravità e alla probabilità di insorgenza del danno, FI relativi alla gravità, alla probabilità di accadimento e alla posizione del danno) e hanno scoperto che fornire più FI fa sì che il processo di ricerca dei partecipanti addestrati diventi più sistematico, cioè mostra un numero maggiore di focus group, una durata media di fissazione più breve e un'area coperta più ampia. Nalanagula et al. (2006) hanno utilizzato ET per registrare la strategia di ricerca di un ispettore esperto e hanno creato tre tipi di visualizzazione, vale a dire uno statico (un'immagine statica che mostra i percorsi di scansione dell'esperto), un dinamico (un cursore che si muove attraverso l'oggetto ispezionato e rappresenta il movimento sequenziale degli occhi dell'esperto) e un ibrido (simile al display dinamico, ma lascia anche una traccia statica mentre il cursore si sposta lungo per visualizzare) uno, per indagare quale tipo di tecnica di visualizzazione è più efficace per la formazione degli ispettori alle prime armi. I loro risultati confermano Bowling (2010), dimostrando che FI aiuta i gruppi di formazione ad adottare una strategia di ricerca più sistematica rispetto ai gruppi che non hanno ricevuto FI. Inoltre, il gruppo che è stato addestrato tramite il display ibrido ha raggiunto le massime prestazioni di ricerca.

Nickles et al. (2003) hanno cercato di verificare come diverse modalità di allenamento (solo istruzione verbale, istruzione verbale e un diagramma statico e istruzione verbale insieme a un diagramma statico e un ausilio dinamico per l'addestramento) influenzino la ricerca di ispezione visiva dei lavoratori, in cui ET è stato utilizzato per monitorare il comportamento visivo dei principianti addestrati. Gli autori hanno scoperto che i principianti hanno migliorato le loro prestazioni di ispezione con meno fissazioni sugli oggetti ispezionati dopo l'addestramento. Tuttavia, non vi era alcuna differenza significativa tra le diverse

modalità di istruzione in termini di prestazioni e caratteristiche del movimento oculare. Gli autori hanno quindi raccomandato l'istruzione verbale come metodo di allenamento preferito nella pratica in quanto è il meno complesso da implementare.

4.6 Logistica

Using a navigation device could help a courier to successfully deliver a product whilst maintaining SA to avoid potential hazards. In this regard, Van Lopik et al. (2020) investigated how different navigation devices (in-sight and handheld) support human couriers during last mile delivery, and used ET to evaluate the couriers' interaction frequency with the navigation devices as well as their distraction during delivery. The results indicate that participants recognize potential hazards with higher accuracy during cycling as compared to walking. In addition, it was found that participants interacted more with the handheld devices than with in-sight displays, leading to a higher accident risk resulting from diverted attention from the interaction with the handheld navigation device.

Per quanto riguarda il magazzino, Renner e Pfeiffer (2017) hanno utilizzato due tipi di dispositivi AR (occhiali Google periferici monoculari e un binocolo Microsoft HoloLens) per confrontare diverse tecniche di guida basate su AR (visualizzazione di frecce, visualizzazione di onde sferiche) con tecniche di pickby-light non AR per il prelievo degli ordini. Gli autori hanno studiato se l'integrazione di ET come mezzo per modulare il feedback in base all'attenzione dell'utente migliora le prestazioni di order picking. Hanno scoperto che l'uso di ET porta a un minor numero di movimenti della testa dei partecipanti, ma allo stesso tempo, i risultati del questionario NASA-TLX mostrano che i partecipanti segnalano un leggero

aumento del carico di attività soggettivo quando usano ET. Gli autori hanno anche scoperto che il binocolo Hololens supera gli occhiali monoculari di Google e il display sferico supera il display a freccia in termini di tempo di completamento del prelievo degli ordini. Ulutas e Ozkan (2019) hanno studiato il carico di lavoro dei conducenti di carrelli elevatori considerando fattori fisici, ambientali e mentali. Gli autori hanno utilizzato il Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire per valutare il disagio posturale dei conducenti e un questionario combinato con misurazioni sul campo per valutare i fattori ambientali. ET è stato utilizzato per stimare il carico di lavoro mentale. I risultati mostrano che i conducenti di carrelli elevatori si fessano di più durante il viaggio che durante le attività di carico e scarico dei pallet, il che implica un carico di lavoro mentale più elevato nel trasporto dei pallet. Inoltre, è stato riscontrato un effetto monotono per tutte le attività dei carrelli elevatori poiché le dimensioni della pupilla dei conducenti sono diventate più piccole nel tempo durante tutte le attività. Gli autori hanno concluso che l'utilizzo dei dati ET in combinazione con i questionari consente una valutazione completa del carico di lavoro dei conducenti di carrelli elevatori. Chadalavada et al. (2020) hanno studiato come i carrelli elevatori autonomi possono percepire l'intenzione umana e comunicare l'intento di navigazione dei carrelli elevatori in un magazzino industriale. Gli autori hanno usato ET per tracciare l'attenzione umana e hanno scoperto che le persone fissano principalmente il loro sguardo sul lato del robot che hanno deciso di passare. Ricevendo informazioni ET, il robot può proiettare la sua intenzione attraverso l'AR spaziale, che consente ai lavoratori di scegliere attivamente percorsi più sicuri durante un incontro.

4.7 Conclusioni

I principali vantaggi dell'utilizzo di ET in diverse aree di applicazione della produzione e della logistica in termini di prestazioni del processo, prestazioni umane, ambiente di lavoro e sicurezza sono riassunti nella seguente *tabella 14*.

TABELLA 14: UTILITÀ DELL'EYE-TRACKING

	Performance del processo	Performance del prodotto	Ambiente lavorativo e sicurezza
Sviluppo del prodotto	Valutare e migliorare il design di prodotto. Migliorare la comunicazione tra le arie fasi del processo	Facilitare il training degli apprendisti	-
Produzione	Identificare le attività che possono essere migliorate. Migliorare l'efficienza della comunicazione uomo/macchina Migliorare l'efficienza interattiva uomo-robot	Facilitare il training degli apprendisti	Migliorare il design del posto di lavoro. Individuare deficit nella concentrazione e situazioni di carico cognitivo elevate.

Controllo qualita'	Migliorare l'efficienza delle ispezioni di controllo qualità.	Facilitare il training degli apprendisti.	Migliorare il design della postazione di lavoro. Riconoscere l'hacking cognitivo.
Logistica	Migliorare l'ergonomia delle comunicazioni uomo-macchina.	-	Migliorare la sicurezza nelle consegne. Migliorare la sicurezza nelle interazioni uomo- macchina.

ET è stato spesso utilizzato esclusivamente per misurare l'attenzione visiva umana, in quanto non è invasivo e fornisce una misurazione più obiettiva. Sono stati utilizzati approcci a metodo misto nel caso in cui i ricercatori fossero interessati a ottenere ulteriori dati soggettivi e, in questo caso, sono stati integrati da studi o indagini qualitative. Questi tipi di studi possono essere trovati in tutte le aree di applicazione. Alcuni studi hanno anche combinato ET con sondaggi per valutare in modo completo il carico di lavoro umano. In questi casi, ET è stato utilizzato per stimare il carico di lavoro mentale, mentre i sondaggi (ad esempio,

il questionario NASA-TLX) sono stati utilizzati per misurare il carico di lavoro fisico o il disagio.

Inoltre, la nostra revisione ha mostrato che la maggior parte degli esperimenti ET sono stati condotti in ambienti di laboratorio e che solo pochi documenti hanno utilizzato ET mobile in impostazioni sul campo, ad esempio per analizzare compiti operativi alle linee di assemblaggio, per stimare l'affaticamento mentale dei conducenti di carrelli elevatori o per esplorare il comportamento di navigazione dei corrieri nella consegna dell'ultimo miglio. Come sostenuto da Wickens et al. (2004), gli studi sul campo hanno una maggiore validità pratica rispetto agli studi di laboratorio, ma consentono un minore controllo delle condizioni sperimentali. I progressi tecnologici degli ultimi anni hanno portato a sistemi ET facili da usare in termini di portabilità e qualità dei dati raccolti, e più studi hanno impiegato ET nel mondo reale per scoprire come il cervello umano e il movimento del corpo interagiscono con altri sistemi. Tuttavia, gli studi sul campo sono spesso più costosi in termini di tempo e costi. In effetti, abbiamo osservato che diversi studi hanno utilizzato studenti universitari come partecipanti a causa della difficoltà di coinvolgere esperti industriali. In questi casi, i partecipanti potrebbero non rappresentare la popolazione presa di mira dai ricercatori, il che potrebbe ridurre la generalizzabilità.

In generale, molti studi hanno utilizzato misure come la durata della fissazione, il numero di fissazioni o il tempo alla prima fissazione per misurare quanto il soggetto è attratto da una particolare caratteristica del prodotto. Inoltre, il rapporto SF è stato adottato per indicare lo stile ambientale o focale dell'elaborazione delle informazioni cognitive da parte del soggetto, e l'entropia dello sguardo è stata introdotta per indicare quanto sia "disordinato" il

comportamento visivo del soggetto. La posizione delle fissazioni, che indica dove l'occhio è focalizzato per un tempo specificato, è stata spesso utilizzata per l'analisi delle attività del lavoratore e l'interazione uomo-macchina / robot nella produzione, come misura della stima dell'intenzione del compito del lavoratore. La variazione del diametro della pupilla è stata utilizzata come misura per quantificare il carico di lavoro mentale dei lavoratori. Il tempo alla prima fissazione e la durata della fissazione sono stati utilizzati per accedere all'usabilità dell'interfaccia uomo-computer/macchina, e il tempo di permanenza è stato utilizzato come soglia per attivare il controllo basato sull'occhio nell'interazione uomo-computer/macchina. Nell'ispezione di qualità, la durata di fissazione e i percorsi di scansione sono stati utilizzati per tracciare la strategia visiva adottata dagli ispettori per il controllo di qualità e la loro attenzione durante l'ispezione.

4.7.1 Tabelle Riassuntive e Statistiche

TABELLA 15: RIASSUNTO DELLE MISURE

Misura	ID	Definizione
Misure Spaziali		
Area di Interesse (AOI)	A	Definisce la regione dello stimolo visivo all'interno della quale i ricercatori sono interessati a estrarre i dati.
Misure di posizione		
Posizione di una fissazione	B	Punto preciso in cui il partecipante ferma lo sguardo, coincide sempre col centro del campo visivo. Definito con coordinate (x,y) , oppure (x,y,z) .

Nearest Neighbour Index (NNI)	C	L'indice, denotato da R, fornisce indicazioni riguardo la distribuzione dei punti di fissazione nello spazio. Se $R > 1$ le fissazioni sono ordinate, casuali se $R = 1$ e clusterizzate se $R < 1$.
Durata delle fissazioni	D	Misura il tempo in cui lo sguardo dell'utente non si sposta.
Dwell time	E	Misura la durata totale delle fissazioni eseguite all'interno di una determinata AOI.
TFF (time to first fixation)	F	Misura il tempo trascorso dall'inizio dell'esperimento e la prima fissazione eseguita.
Diametro della pupilla	G	Quantifica il diametro pupillare. I valori sono generalmente restituiti prima in pixels, e poi trasformati in millimetri.
Misure di numerosità		
Numero di fissazioni	H	Misura quante volte un'area di interesse viene fissata.
Frequenza delle fissazioni	I	Il numero di fissazioni al secondo/minuto.
Blink rate	J	Quantifica il numero di battiti delle palpebre al secondo/minuto.
Misure di movimento		
Ampiezza delle saccadi	K	Misura la distanza che l'occhio percorre tra una fissazione e la seguente.
Durata delle saccadi	L	Misura il tempo trascorso tra due fissazioni consecutive.

Velocità delle saccadi	M	La velocità con cui si esegue la saccade per la prima fissazione.
Entropia dello sguardo	N	L'entropia stazionaria misura la dispersione delle fissazioni, mentre l'entropia di transizione misura l'ampiezza della transizione da un'AOI ad un'altra.
Misure aggregate		
Attention Map	O	Solitamente sotto forma di Heatmap, descrive la distribuzione spaziale dei movimenti oculari.
Scanpath	P	Descrizione dei movimenti oculari nello spazio, in un certo lasso di tempo.
SF ratio	Q	Rapporto tra l'ampiezza di una saccade e la durata di una fissazione.

Nella *tabella 15* vengono elencate tutte le principali misure che sono state utilizzate nei documenti trattanti esperimenti in ambito manifatturiero con l'utilizzo della tecnologia eye-tracking. L'ID della misura è inserito al fine di mettere in relazione questa tabella con quella successiva, in cui è analizzato documento per documento quali metriche sono state utilizzate in quella particolare situazione, specificando l'area di applicazione e la modalità tramite la quale le misurazioni creano valore all'esperimento.

Le misure in questione sono state divise secondo i criteri stabiliti in questo documento, e sono separate perciò in cinque categorie: misure spaziali, misure di posizione, misure di numerosità, di movimento ed infine misure aggregate.

In seguito, la *tabella 16* contenente le casistiche di applicazione; i numeri identificativi di ogni documento trovano riscontro nella prima parte della bibliografia.

TABELLA 16: CASISTICHE DI APPLICAZIONE

Area	Applicazione	ID	Citazione	Misure di eye-tracking	Misure soggettive	Modalità di osservazione principale
Sviluppo del prodotto	Interpretare la percezione del prodotto da parte del consumatore	1	Li et al. (2018)	D		Attention directed to stimuli
		2	Du e MacDonald (2014)	D, H, Q, F	si	Attention directed to stimuli
		3	Borgianni (2019)	D, Q, G	si	Attention directed to stimuli
		4	Purucker (2014)	F, D		Attention directed to stimuli
		5	Hyun (2017)	D, H, C	si	Attention directed to stimuli
		6	Kuo (2021)	D	si	Attention directed to stimuli

		7	Yang (2021)	G, E, F, H	si	Attention directed to stimuli, emotional arousal
		8	Yang (2016)	O, B		Attention directed to stimuli
		9	Li (2017)	C, B, D, G, J		Attention directed to stimuli
		10	Schmitt (2014)	D, P	si	Attention directed to stimuli
		11	Wang (2020)	J, D, G, H, L		Attention directed to stimuli
	Analisi del processo di design	12	Matthiesen (2013)	P, O		Attention Patterns
		13	Nambiar (2013)	O	si	Attention Patterns
		14	Nelius (2020)	H	si	Attention Patterns
		15	Maier (2014)	G, J, D		Attention Patterns

		16	Boa and Hicks (2016)	K, D, Q		Attention Patterns
		17	Doellken (2021)	N	si	Attention Patterns
		18	Metha (2020)	D		Attention Patterns
Production	Work Analysis and Task Guidance	19	Bhatia (2015)	D		Level of Processing
		20	Shotton e Kim (2021)	H, D		Level of Processing
		21	Amrouche (2018)	B, C		Task intent prediction
		22	Haslgrubler (2019)	B	si	Task intent prediction
		23	Manns (2021)	B		Task intent prediction
		24	Bovo (2020)	B		Task intent prediction
		25	Sausman (2012)	B		Attention Guidance
		26	Ivaschenko (2018)	B		Attention Guidance
		27	Renner e Pfeiffer (2017)	B	si	Attention Guidance

		28	Renner e Pfeiffer (2017)	B	si	Attention Guidance
		29	Haslgrubler (2018)	B	si	Tattention Patterns
	Evaluating Mental Workload	30	Nandakum ar (2014)	B, G		Mental Workload
		31	Straeter (20220)	G		Mental Workload
		32	Paletta (2021)	B		Mental Workload
		33	Peruzzini (2017)	P, O		Mental Workload
		34	Peruzzini (2020)	P, O, G	si	Mental Workload
	35	Van Acker (2021)	B	si	Mental Workload	
	Assessing human– computer/ machine interfaces and interaction	36	Zulch e Stowasser (2003)	F,D,L P	si	Levels of Processing and Perceptual Fluency
		37	Wu (2016)	F, B, O	si	Levels of Processing and

						Perceptual Fluency
		38	Walper (2020)	D		Levels of Processing and Perceptual Fluency
		39	Zhang (2017)	F, D, G, B, O		Levels of Processing and Perceptual Fluency
		40	Lusic (2016)	D, I		Levels of Processing and Perceptual Fluency
		41	Heinz (2020)	B, P	si	Visual Patterns
		42	Tang (2019)	D, E, O	si	Situational Awareness
		43	Bardins (2008)	B, E	si	Visual Control
		44	Jungwirth (2018)	E	si	Visual Control

		45	Guo (2013)	B	si	Visual Control
		46	Zhao (2021)	B		Task Intent Prediction
		47	Li (2021)	B		Task Intent Prediction
	Facilitating human-machine/robot collaboration	48	Palinko (2016)	B	si	Task Intent Prediction
		49	Admonie Srinivasa (2016)	B		Task Intent Prediction
		50	Fan (2020)	B		Task Intent Prediction
		51	Berg (2019)	B, J		Task Intent Prediction
		52	Paletta (2017)	A	si	Situational Awareness
		53	Dini (2017)	I, E, C	si	Situational Awareness
		54	Paletta (2019)	A	si	Situational Awareness
Quality inspection	Investigating quality inspection patterns	55	Schlosser (2016)	O	si	Attention Patterns
		56	Niemann (2019)	O	si	Attention Patterns

		57	Tuncer (2020)	D, H		Attention Distribution
		58	Ozkan e Ulutas (2016)	E, H, D, G, O		Attention Patterns and Level of Processing
		59	Ulutas (2020)	D, H, E, F, O		Attention Patterns
		60	Aust (2021)	O	si	Attention Patterns
		61	Huang (2020)	O		Cognitive Hacking
	Quality inspection training	62	Wang (1997)	C		Attention Patterns
		63	Duchowski (2000)	B		Attention Patterns
		64	Sadasivan (2005)	A, O, E, H, D	si	Attention Patterns
		65	Bowling (2010)	O, H		Attention Patterns
		66	Nalanagula (2006)	P	si	Attention Patterns
		67	Nickles (2003)	H, D, K		Attention directed to stimuli and

						levels of processing
Logistics	ET applications in logistics	68	Von Lopik (2020)	D, H	si	Situational Awareness
		69	Renner e Pfeiffer (2017)	B	si	Attention Guidance
		70	Ulutas e Ozkan (2019)	H, D, G	si	Mental Workload
		71	Chadalava da (2020)	H, A		Task intent prediction

Da questa tabella si evince che la misura più utilizzata è la posizione delle fissazioni, in quanto è stata utilizzata per un totale di 27 volte su 71 documenti analizzati. Segue la durata delle fissazioni con 26, e le *attention map* con 16. Questo risultato è molto importante siccome dimostra che allo stato attuale della tecnologia, l'identificazione delle fissazioni è il metodo più accreditato per le misurazioni oculari. I numeri identificativi di ciascun documento trovano riscontro nella prima tabella della bibliografia.

La *figura 22* mostra la percentuale di utilizzo delle varie metriche nei documenti analizzati.

È interessante capire in che quantità questi indicatori sono stati usati per ciascun documento. I dati indicano che l'intervallo di numerosità va tra uno e cinque indicatori utilizzati, con una media calcolata di due indicatori per documento. Infatti, gli esperimenti che hanno utilizzato più di due indicatori sono 19, mentre quelli che ne hanno utilizzati due oppure uno sono 52.

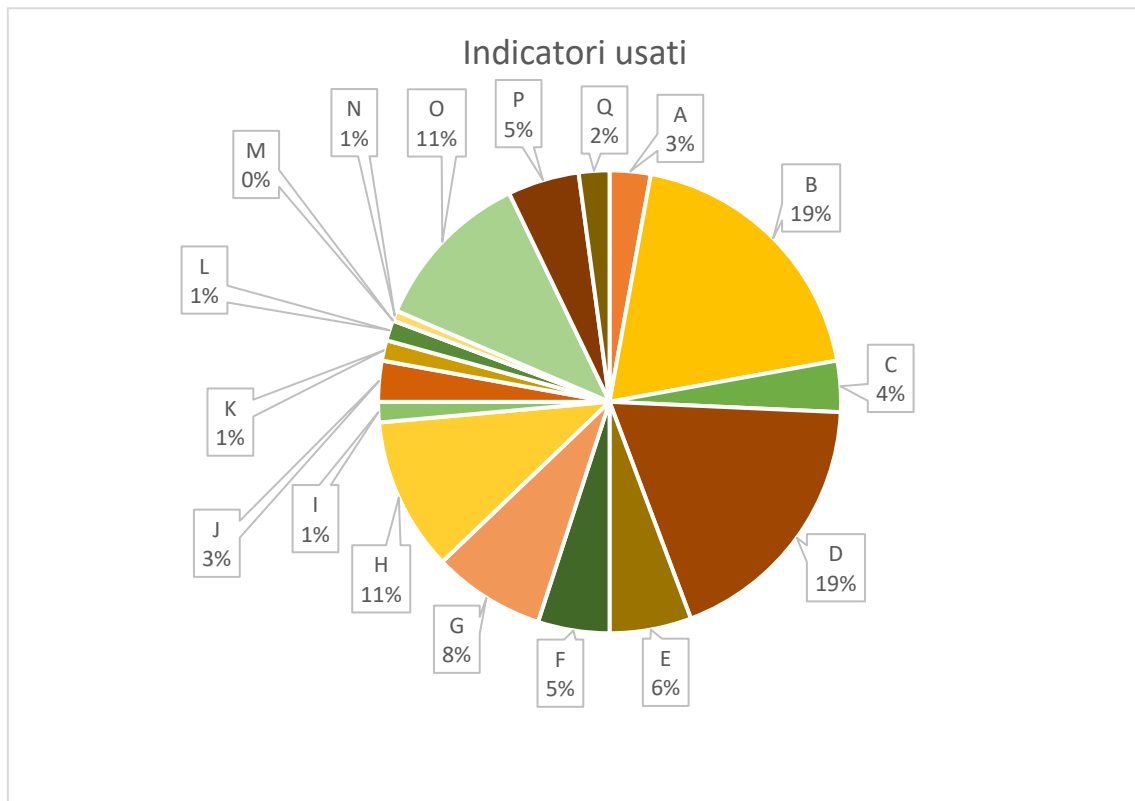


FIGURA 22: GRAFICO A TORTA CHE SPIEGA IL NUMERO DI INDICATORI USATI ALL'INTERNO DELLE ANALISI.

Per concludere queste analisi, va osservata la percentuale di documenti che si avvale di un'indagine di tipo soggettivo, ossia di questionari ed interviste individuali. Sono 34, ossia circa il 50%, ma questo dato non tiene conto delle altre tecniche di misurazione fisiologiche che sono state abbinate all'eye-tracking durante gli esperimenti. Difatti, lo scopo di questa tesi è cercare di comprendere come le misure fisiologiche possono sostituire le misure soggettive, che sono pertanto già affermate e considerate valide, nonostante portino spesso a risultati distorti.

Capitolo 5

Conclusioni

5.1 Considerazioni sull'utilizzo di dispositivi eye-tracking in sostituzione alle tecniche soggettive tradizionali

L'obiettivo di questo documento è fornire una visione generale di questa tecnologia che non è una completa novità, ma che, come visto, negli ultimi 20 anni ha guadagnato sempre più credito, grazie soprattutto ai nuovi dispositivi in grado di dimostrare un'efficacia ed una validità più elevate. Infatti, la storia dell'eye-tracking non inizia in questo secolo, ma pone le sue radici nello scorso. Altro fattore influente è stata appunto la maggior attenzione che si pone nei confronti dell'aspetto mentale delle persone, e in questo caso specifico dei lavoratori. In una società che sta lasciando indietro il puro lavoro manuale, diventerà sempre più importante curarsi della mente delle persone, siccome col progresso della tecnologia la sicurezza sul lavoro continua ad aumentare, i principali rischi per il futuro sono prevedibilmente quelli legati a caratteri emotivi e psicologici. Ma non è solo la sicurezza, per quanto sia un aspetto molto importante, a beneficiare degli studi effettuati tramite dispositivi eye-tracking: numerosi altri aspetti esposti in precedenza, come la produttività e l'efficienza, ne traggono beneficio.

L'eye-tracking si pone quindi come nuovo strumento di misurazione ed analisi del carico cognitivo, e ha come obiettivo quello di rimpiazzare metodi meno efficaci ma usati comunemente allo stato attuale. Le misure soggettive, ossia le

più utilizzate al giorno d'oggi, hanno grandi vantaggi ma ugualmente grandi svantaggi. Il NASA-TLX, il Workload Profile sono misure ottime nella teoria, in quanto sono in grado di fornire importanti considerazioni sullo stato mentale dei lavoratori durante l'esecuzione di una task. Nella pratica però, i fattori che possono influenzare il risultato sono molti, e non sono assolutamente controllabili o migliorabili. La motivazione, come abbiamo visto, deriva dalle modalità in cui devono essere sottoposti i questionari: sono misure ex-post che richiedono che l'attività sia finita per poterla analizzare, ma soprattutto non sono e non possono essere oggettivi. Diverse condizioni di emotività nei soggetti, situazioni particolari personali che vanno oltre al posto di lavoro, lo stress a cui si viene sottoposti quando si deve fornire un giudizio sul proprio operato, sono tutti fattori che rendono i metodi soggettivi poco validi. La loro facilità di impiego è sorprendente, e questa è il loro più grande punto a favore. Difatti, le altre tecniche di misurazione richiedono un setup complicato, apparecchiature costose e una conoscenza informatica importante; ottenere questi tre fattori non sempre è immediato, e non è nella volontà di tutti i datori di lavoro implementare questi meccanismi. Siccome è molto più semplice, intuitivo ed economico utilizzare misure soggettive, queste sono ancora le più utilizzate in campo manifatturiero.

L'eye-tracking rimane perciò ancorato, per il momento, ad una fase di sviluppo abbinata ad un ingresso nel mercato che avviene a velocità ridotta. Infatti, dopo questa analisi della letteratura si può facilmente dedurre che quasi tutti i documenti analizzati non derivano da osservazioni in contesti propriamente reali, ma sono ricostruzioni fatte ad hoc per poter dimostrare nuove teorie e arrivare a delle conclusioni che però non portano ad un miglioramento diretto della vita dei lavoratori. Questo perché, nonostante la tecnologia eye-tracking sia sviluppata ed efficiente, non è ancora in grado di presentare un procedimento standard di

misurazione, che fornisca delle risposte concrete e facilmente leggibili universale. È proprio in questo che risiede la forza delle misurazioni soggettive: si tratta di algoritmi, sequenze di operazioni standardizzate che portano a risultati standardizzati. È facile in effetti comparare due situazioni analizzate tramite il NASA-TLX, ma lo è molto di meno quando si parla di due studi eye-tracking. Perciò possiamo affermare che l'eye-tracking è una tecnologia affidabile e fornisce risultati concreti, ma è ancora lontana da essere la tecnica di misurazione migliore per il carico cognitivo, in quanto non è facilmente implementabile ma soprattutto non è facilmente ripetibile. Ha sicuramente il potenziale per diventare una tecnica di misura universalmente usata, ma la tecnologia in questione non è probabilmente allo stato che gli consente di sostituire le misure soggettive, in quanto non soddisfa ancora alcuni requisiti fondamentali a farla diventare il paradigma dominante, ossia:

- Mancanza di un output standard che permette di confrontare situazioni differenti.
- Non è stato ancora trovato una metrica di misurazione che sia valida al 100% e valida in ogni contesto.
- Spesso si necessita di un setup, o di un ambiente virtuale o costruito ad hoc.
- Mancano delle linee guida, sia per gli input che per gli output, che permettano di rendere il processo di misurazione del carico cognitivo efficace completamente.

L'eye-tracking, a discapito dei suoi problemi di applicabilità nel mondo reale, ha l'importantissima capacità di misurare le sensazioni dell'essere umano tramite il suo subconscio. È in questo concetto che risiede la vera potenza di questa tecnologia. I dati che derivano dagli studi di eye-tracking sono dati "puri", non

filtrati da elementi esterni alla situazione analizzata. Questi dati quindi sono in grado di fornire degli insight sulla mente umana che vanno oltre a quello che una persona può esprimere a parole, perché derivano da uno strato più interno della coscienza. Infatti una persona può effettivamente non sapere di essere sottoposta ad un determinato tipo di stress, ma le metriche come la dilatazione pupillare, la frequenza delle fissazioni e l'ampiezza delle saccadi sono in grado di fornire delle informazioni che vanno oltre il pensiero umano, visto che derivano direttamente dai processi cerebrali. L'occhio umano, infatti, non riflette ciò che pensiamo, ma ciò che la nostra mente elabora. È un concetto complicato ma veritiero, e che rappresenta uno dei due punti a favore principali che l'ET possiede.

Il secondo punto a favore che presenta l'eye-tracking è quello di fornire informazioni più dettagliate riguardanti la situazione analizzata. Infatti, i dati estratti non consentono solo di capire se l'attività eseguita è stressante o meno a livello cognitivo, bensì tramite i risultati si è in grado di scoprire in quale preciso modo questa lo è. Per esempio, se durante una task il soggetto compie delle fissazioni prolungate verso un determinato componente, questo consente di capire che tale componente è fonte di carico cognitivo o comunque è oggetto di dubbio o incomprensioni. Perciò, grazie all'ET, non ci si limita a misurare il workload di un'attività, ma si può sapere precisamente in che modo tale attività pone un carico cognitivo sul soggetto. Riuscendo a rilevare esattamente il problema, si è in grado di correggerlo senza dover prima individuare dove sta. È quindi così che i dispositivi eye-tracking si distinguono dalle misurazioni soggettive: una volta analizzati i risultati, tramite l'ET si conosce già la posizione spaziale e temporale del problema, mentre tramite le tecniche soggettive bisogna effettuare un'ulteriore analisi approfondita per poterlo individuare.

Riassumendo questi concetti possiamo ora fare un paragone finale tra l'eye-tracking e le tecniche di misurazione soggettive. L'ET richiede dispositivi e setup specifici, è difficilmente utilizzabile in contesti di utilizzo reali e i dati estratti vanno analizzati in seguito tramite tecniche matematiche. Le misurazioni soggettive invece non presentano particolari difficoltà di utilizzo, teoricamente forniscono risultati veritieri ma non è lo stesso nella pratica, visto che ci sono innumerevoli fattori che possono influenzare la compilazione di un questionario da parte dei soggetti. Le tecniche soggettive forniscono una visione generale di quello che può essere il carico cognitivo durante una task, mentre l'eye-tracking è in grado di dare informazioni molto precise riguardanti la vera origine del carico, rendendo il processo di analisi e correzione dei problemi in azienda complessivamente più snella. Non vi è però ancora uno standard per spiegare i risultati ottenuti, e perciò è difficile analizzare situazioni differenti con lo stesso setup, mentre metodi come il NASA-TLX rendono il processo universale. Infine, l'eye-tracking, così come l'EEG, è in grado di mostrare direttamente i processi mentali dell'utente, estrapolando dati che sarebbero impossibile ottenere da misurazioni soggettive.

L'eye-tracking rappresenta quindi il futuro dell'analisi del carico cognitivo, ma la tecnologia deve effettuare ancora dei passi avanti prima di diventare il nuovo paradigma.

5.2 Idee per il futuro: eye-tracking e portable EEG in ambito manifatturiero

La collaborazione tra l'eye-tracking e l'elettroencefalogramma non è qualcosa di nuovo, bensì è un metodo sperimentato e riconosciuto come uno dei migliori sistemi per misurare l'attività cerebrale nella sua completezza (Michael Plöchl, 2012). Anche in questo caso, però, l'EEG presenta il problema del setup: solitamente, infatti, non c'è possibilità di movimento durante un elettroencefalogramma, a causa degli ingombranti macchinari necessari per lo studio. Gli studi effettuati finora consistono perciò in simulazioni in ambiente virtuale oppure in studi effettuati tramite immagini proiettate su uno schermo, senza una reale interazione dell'utente con l'ambiente circostante. Essendo però queste due tecniche molto efficaci e potenzialmente perfette per misurare l'attività cerebrale e di conseguenza il carico cognitivo, la loro unione rappresenta la miglior modalità di analisi del carico cognitivo. La tecnologia deve però progredire, al fine di aumentare la portabilità degli EEG.

Negli ultimi anni sono apparsi in commercio vari prodotti nuovi, come il sistema Cognionics CGX Electrode Systems mostrato in figura, che rappresenta una delle migliori soluzioni al problema della portabilità. Questi apparecchi funzionano



FIGURE 22: DISPOSITIVO PER L'EEG PORTATILE

tramite elettrodi dry e wireless. Questi sistemi sono stati sviluppati nel corso di anni di ricerca, parzialmente sponsorizzata dal Dipartimento della Difesa USA, NASA e il National Institute of Health e consentono una veloce preparazione dell'EEG.

La possibilità di effettuare studi tramite un dispositivo di eye-tracking unito ad un EEG portatile, rappresenta potenzialmente il metodo migliore e completo per studiare il carico cognitivo in ambienti reali. L'elettroencefalogramma, infatti, è in grado di fornire dei risultati che possono spiegare la dilatazione pupillare in maniera molto migliore di quello che fa l'eye-tracking. Abbiamo visto che la misurazione della pupilla durante una task in un ambiente reale è molto problematica, ma allo stesso tempo questa metrica è la più importante al fine della misurazione del carico cognitivo: lasciando però la misurazione della pupilla al dispositivo EEG, e utilizzando invece le metriche per le fissazioni e le saccadi tramite il dispositivo eye-tracking, si può arrivare a dei risultati ottimali.

6 Bibliografia

Documenti relativi al capitolo 4

ID	REFERENCE
1	Li, B., Wang, Y., Wang, K., Yang, J., & Liu, L. (2018). A Study on a Novel Application of Eye Tracking Technology in Product Customization. In <i>Lecture Notes in Electrical Engineering</i> (Vol. 451, pp. 617–628). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5768-7_65 .
2	Du, P., & MacDonald, E. F. (2014). Eye-Tracking Data Predict Importance of Product Features and Saliency of Size Change. <i>Journal of Mechanical Design</i> , 136(8). https://doi.org/10.1115/1.4027387
3	Borgianni, Y., Maccioni, L., & Basso, D. (2019). Exploratory study on the perception of additively manufactured end-use products with specific questionnaires and eyetracking. <i>International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)</i> , 13 (2), 743–759. https://doi.org/10.1007/s12008-019-00563-w
4	Purucker, C., Sprott, D. E., & Herrmann, A. (2014). Consumer response to car fronts: Eliciting biological preparedness with product design. <i>Review of Managerial Science</i> , 8 (4), 523–540. https://doi.org/10.1007/s11846-013-0116-2
5	Hyun, K. H., Lee, J.-H., & Kim, M. (2017). The gap between design intent and user response: Identifying typical and novel car design elements among car brands for evaluating visual significance. <i>Journal of Intelligent Manufacturing</i> , 28(7), 1729–1741. https://doi.org/10.1007/s10845-015-1176-8
6	Kuo, J.-Y., Chen, C.-H., Koyama, S., & Chang, D. (2021). Investigating the relationship between users' eye movements and perceived product attributes in design concept evaluation. <i>Applied Ergonomics</i> , 94(February), Article 103393. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103393

7	Yang, X., Wang, R., Tang, C., Luo, L., & Mo, X. (2021). Emotional design for smart product-service system: A case study on smart beds. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 298, Article 126823. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126823
8	Yang, X., He, H., Wu, Y., Tang, C., Chen, H., & Liang, J. (2016). User intent perception by gesture and eye tracking. <i>Cogent Engineering</i> , 3(1), 1221570. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1221570
9	Li, B.-R., Wang, Y., & Wang, K.-S. (2017). A novel method for the evaluation of fashion product design based on data mining. <i>Advances in Manufacturing</i> , 5(4), 370–376. https://doi.org/10.1007/s40436-017-0201-x
10	Schmitt, R., Kohler, M., Dur´a, J. V., & Diaz-Pineda, J. (2014). Objectifying user attention and emotion evoked by relevant perceived product components. <i>Journal of Sensors and Sensor Systems</i> , 3(2), 315–324. https://doi.org/10.5194/jsss-3-315-2014
11	Wang, Y., Yu, S., Ma, N., Wang, J., Hu, Z., Liu, Z., & He, J. (2020). Prediction of product design decision Making: An investigation of eye movements and EEG features. <i>Advanced Engineering Informatics</i> , 45(April), Article 101095. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101095
12	Matthiesen, S., Meboldt, M., Ruckpaul, A., & Mussnug, M. (2013). Eye tracking, a method for engineering design research on engineers’ behavior while analyzing technical systems. In <i>Proceedings of the International Conference on Engineering Design</i> , ICED, 7 DS75-07(August), 277–286.
13	Nambiar, S., Madathil, K. C., Paul, M. D., Zelaya, M., Koikkara, R., & Gramopadhye, A. K. (2013). Understanding the visualization strategies used by experts when reading mechanical part drawings using eye tracking. <i>IIE Annual Conference and Expo 2013</i> , January, 503–511.

- 14** Nelius, T., Doellken, M., Zimmerer, C., & Matthiesen, S. (2020). The impact of confirmation bias on reasoning and visual attention during analysis in engineering design: An eye tracking study. *Design Studies*, 71, Article 100963. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2020.100963>
- 15** Maier, A. M., Baltzen, N., Christoffersen, H., & Strle, H. (2014). Towards Diagram Understanding: A Pilot-Study Measuring Cognitive Workload Through Eye-Tracking. *International Conference on Human Behaviour in Design*. Manns, M., Tuli, T. B., & Schreiber, F. (2021).
- 16** Boa, D. R., & Hicks, B. (2016). Discriminating engineering information interaction using eye tracking and an information operations model. *Proceedings of International Design Conference, DESIGN, DS*, 84, 1–10.
- 17** Doellken, M., Zapata, J., Thomas, N., & Matthiesen, S. (2021). Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: A study on eye movements in exploiting design guidelines. *Procedia CIRP*, 100, 415–420. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.097>
- 18** Mehta, P., Malviya, M., McComb, C., Manogharan, G., & Berdanier, C. G. P. (2020). Mining design heuristics for additive manufacturing via eye-tracking methods and hidden Markov modeling. *Journal of Mechanical Design*, 142(12). <https://doi.org/10.1115/1.4048410>
- 19** Bhatia, N., Sen, D., & Pathak, A. V. (2015). *Visual Behavior Analysis of Human Performance in Precision Tasks* (D. Harris (ed.); Vol. 9174, pp. 95–106). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20373-7_10.
- 20** Shotton, T., & Kim, J. H. (2021). In *Assessing Differences on Eye Fixations by Attention Levels in an Assembly Environment* (pp. 417–423). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51041-1_55.
- 21** Amrouche, S., Gollan, B., Ferscha, A., & Heftberger, J. (2018). Activity Segmentation and Identification based on Eye Gaze Features. In *Proceedings*

of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference (pp. 75–82). <https://doi.org/10.1145/3197768.3197775>

22 Haslgrübler, M., Gollan, B., Thomay, C., Ferscha, A., & Heftberger, J. (2019). Towards skill recognition using eye-hand coordination in industrial production. In Proceedings of the 12th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments (pp. 11–20). <https://doi.org/10.1145/3316782.3316784>

23 Manns, M., Tuli, T. B., & Schreiber, F. (2021). Identifying human intention during assembly operations using wearable motion capturing systems including eye focus. *Procedia CIRP*, 104, 924–929. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.155>

24 Bovo, R., Binetti, N., Brumby, D. P., & Julier, S. (2020). Detecting Errors in Pick and Place Procedures Detecting. In Proceedings of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces (pp. 536–545). <https://doi.org/10.1145/3377325.3377497>

25 Sausman, J., Samoylov, A., Regli, S. H., & Hopps, M. (2012). Effect of eye and body movement on augmented reality in the manufacturing domain. In 2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402591>

26 Ivaschenko, A., Khorina, A., & Sitnikov, P. (2018). Accented visualization by augmented reality for smart manufacturing applications. *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, 519–522. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390759>

27 Renner, P., & Pfeiffer, T. (2017a). [POSTER] Augmented Reality Assistance in the Central Field-of-View Outperforms Peripheral Displays for Order Picking: Results from a Virtual Reality Simulation Study. In 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.59>

- 28** Renner, P., & Pfeiffer, T. (2017b). Attention guiding techniques using peripheral vision and eye tracking for feedback in augmented-reality-based assistance systems. In 2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI) (pp. 186–194). <https://doi.org/10.1109/3DUI.2017.7893338>
- 29** Haslgrübler, M., Ferscha, A., & Heftberger, J. (2018). Transferring Expert Knowledge through Video Instructions. In Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference (pp. 358–362). <https://doi.org/10.1145/3197768.3201571>
- 30** Nandakumar, N., Arularasu, M., & Sivaprakash, P. (2014). Real time assessment of stress level of workers in factories by measuring their eye parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(23), 21449–21457.
- 31** Straeter, O. (2020). An Objective Measure for Detecting Workload and Errors in Monotone, Repetitive or Fatigue-Causing Environments Using Pupil Variation. In *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 1318, pp. 3–12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62302-9_1
- 32** Paletta, L., Ganster, H., Schneeberger, M., Pszeida, M., Lodron, G., Pechst" adt, K., Spitzer, M., & Reischl, C. (2021). Towards large-scale evaluation of mental stress and biomechanical strain in manufacturing environments using 3D-referenced gaze and wearable-based analytics. *Electronic Imaging*, 2021(6). <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2021.6.IRIACV-310>
- 33** Peruzzini, M., Grandi, F., & Pellicciari, M. (2017). Benchmarking of tools for user experience analysis in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.182>
- 34** Peruzzini, M., Grandi, F., & Pellicciari, M. (2020). Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring. *Computers & Industrial Engineering*, 139, Article 105600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.047>

- 35** Van Acker, B. B., Parmentier, D. D., Conradie, P. D., Van Hove, S., Biondi, A., Bombeke, K., Vlerick, P., & Saldien, J. (2021). Development and validation of a behavioural video coding scheme for detecting mental workload in manual assembly. *Ergonomics*, 64(1), 78–102. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1811400>
- 36** Zülch, G., & Stowasser, S. (2003). Eye Tracking for Evaluating Industrial HumanComputer Interfaces. In *The Mind's Eye* (pp. 531–553). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50029-3>.
- 37** Wu, L., Zhu, Z., Cao, H., & Li, B. (2016). Influence of information overload on operator's user experience of human-machine interface in LED manufacturing systems. *Cognition, Technology & Work*, 18(1), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0352-0>
- 38** Walper, D., Kassau, J., Methfessel, P., Pronold, T., & Einhauser, W. (2020). Optimizing user interfaces in food production: Gaze tracking is more sensitive for A-B-testing than behavioral data alone. *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3379156.3391351>
- 39** Zhang, X., Wang, X., & Shiya, W. (2017). Research on the Improvement of CNC Machine Tool HMI Based on Eye Tracking Experiment. In *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)* (pp. 239–244). <https://doi.org/10.1109/ES.2017.47>
- 40** Jungwirth, F., Murauer, M., Haslgrübler, M., & Ferscha, A. (2018). Eyes are different than Hands. In *Proceedings of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference* (pp. 303–310). <https://doi.org/10.1145/3197768.3201565>
- 41** Heinz, M., Büttner, S., & Rocker, C. (2020). Exploring users' eye movements when using projection-based assembly assistive systems. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence*

and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12203 LNCS (pp. 259–272).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50344-4_19

42 Tang, G., Webb, P., & Thrower, J. (2019). The development and evaluation of Robot Light Skin: A novel robot signalling system to improve communication in industrial human–robot collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56 (August 2018), 85–94.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.08.005>

43 Bardins, S., Poitschke, T., & Kohlbecher, S. (2008). Gaze-based interaction in various environments. In *Proceeding of the 1st ACM Workshop on Vision Networks for Behavior Analysis – VNBA '08*, 47. <https://doi.org/10.1145/1461893.1461903>.

44 Jungwirth, F., Murauer, M., Haslgrübler, M., & Ferscha, A. (2018). Eyes are different than Hands. In *Proceedings of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference* (pp. 303–310).
<https://doi.org/10.1145/3197768.3201565>

45 Guo, W., Cheng, C., Cheng, M., Jiang, Y., & Tang, H. (2013). Intent Capturing through Multimodal Inputs. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 8007 LNCS (Issue PART 4, pp. 243–251).
https://doi.org/10.1007/978-3-642-39330-3_26.

46 Zhao, X., He, Y., Chen, X., & Liu, Z. (2021). Human–Robot Collaborative Assembly Based on Eye–Hand and a Finite State Machine in a Virtual Environment. *Applied Sciences*, 11(12), 5754. <https://doi.org/10.3390/app11125754>

47 Li, M., Xu, Y., & Yang, A. (2021). Collaborative Robot Grasping System Based on Gaze Interaction. In *Communications in Computer and Information Science*: Vol. 1469 CCIS (pp. 77–86). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7213-2_8.

- 48** Palinko, O., Rea, F., Sandini, G., & Sciutti, A. (2016). Robot reading human gaze: Why eye tracking is better than head tracking for human-robot collaboration. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759741>
- 49** Admoni, H., & Srinivasa, S. (2016). Predicting user intent through eye gaze for shared autonomy. In *The 2016 AAAI Fall Symposium Series: Shared Autonomy in Research and Practice* (pp. 298–303).
- 50** Fan, Z., Lin, C., & Fu, C. (2020). A Gaze Signal Based Control Method for Supernumerary Robotic Limbs. In 2020 3rd International Conference on Control and Robots (ICCR) (pp. 107–111). <https://doi.org/10.1109/ICCR51572.2020.9344272>
- 51** Berg, J., Lottermoser, A., Richter, C., & Reinhart, G. (2019). Human-Robot-Interaction for mobile industrial robot teams. *Procedia CIRP*, 79, 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.080>
- 52** Paletta, L., Dini, A., Murko, C., Yahyanejad, S., Schwarz, M., Lodron, G., Ladstätter, S., Paar, G., & Velik, R. (2017). Towards Real-time Probabilistic Evaluation of Situation Awareness from Human Gaze in Human-Robot Interaction. In *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 247–248). <https://doi.org/10.1145/3029798.3038322>
- 53** Dini, A., Murko, C., Yahyanejad, S., Augsdorfer, U., Hofbauer, M., & Paletta, L. (2017). Measurement and prediction of situation awareness in human-robot interaction based on a framework of probabilistic attention. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017-Sept(c), 4354–4361. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206301>.
- 54** Paletta, L., Dini, A., Murko, C., Yahyanejad, S., & Augsdorfer, U. (2019). Estimation of situation awareness score and performance using eye and head gaze for human-robot collaboration. *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye*

Tracking Research & Applications, 3322504(c), 1–3.
<https://doi.org/10.1145/3314111.3322504>.

55 Schlosser, M., Niemann, J., & Fussenecker, C. (2016). Eye Tracking usage as a Possible Application to Optimize Processes in the Engineering Environment. In 6th International Conference on Competitive Manufacturing (pp. 2–5).

56 Niemann, J., Fussenecker, C., & Schlosser, M. (2019). Eye Tracking for Quality Control in Automotive Manufacturing. In Communications in Computer and Information Science (Vol. 1060, pp. 289–298). https://doi.org/10.1007/978-3-030-28005-5_22.

57 Tuncer, M. C., Ozkan, N. F., & Ulutas, B. H. (2020). A systematic approach to assess visual inspection tasks: An assembly line case. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 29(3), 418. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2020.106024>

58 Ozkan, F., & Ulutas, B. (2016). Use of an eye-tracker to assess workers in ceramic tile surface defect detection. In 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (pp. 088–091). <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2016.7593540>

59 Ulutas, B. H., Ozkan, N. F., & Michalski, R. (2020). Application of hidden Markov models to eye tracking data analysis of visual quality inspection operations. *Central European Journal of Operations Research*, 28(2), 761–777. <https://doi.org/10.1007/s10100-019-00628-x>

60 Aust, J., Mitrovic, A., & Pons, D. (2021). Assessment of the effect of cleanliness on the visual inspection of aircraft engine blades: An eye tracking Study. *Sensors*, 21(18), 6135. <https://doi.org/10.3390/s21186135>

61 Huang, W., Chen, X., Jin, R., & Lau, N. (2020). Detecting cognitive hacking in visual inspection with physiological measurements. *Applied Ergonomics*, 84(October 2019), 103022. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.103022>.

- 62** Wang, M.-J.-J., Lin, S.-C., & Drury, C. G. (1997). Training for strategy in visual search. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(2), 101–108. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(96)00043-1)
- 63** Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34(4), 455–470. <https://doi.org/10.3758/BF03195475>
- 64** Sadasivan, S., Greenstein, J. S., Gramopadhye, A. K., & Duchowski, A. T. (2005). Use of eye movements as feedforward training for a synthetic aircraft inspection task. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '05*, 141–149. <https://doi.org/10.1145/1054972.1054993>.
- 65** Bowling, S. R. (2010). Evaluating the effectiveness of a priori information on process measures in a virtual reality inspection task. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3(1), 221–248. <https://doi.org/10.3926/jiem.2010.v3n1.p221-248>
- 66** Nalanagula, D., Greenstein, J. S., & Gramopadhye, A. K. (2006). Evaluation of the effect of feedforward training displays of search strategy on visual search performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(4), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.11.008>
- 67** Nickles, G. M., Melloy, B. J., & Gramopadhye, A. K. (2003). A comparison of three levels of training designed to promote systematic search behavior in visual inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 32(5), 331–339. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(03\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(03)00073-8)
- 68** van Lopik, K., Schnieder, M., Sharpe, R., Sinclair, M., Hinde, C., Conway, P., West, A., & Maguire, M. (2020). Comparison of in-sight and handheld navigation devices toward supporting industry 4.0 supply chains: First and last mile deliveries at the human level. *Applied Ergonomics*, 82(July 2019), 102928. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102928>

69	Renner, P., & Pfeiffer, T. (2017c). Evaluation of Attention Guiding Techniques for Augmented Reality-based Assistance in Picking and Assembly Tasks. In Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces Companion (pp. 89–92). https://doi.org/10.1145/3030024.3040987
70	Ulutas, B. H., & Ozkan, N. F. (2019). Assessing occupational risk factors for forklift drivers. <i>Le Travail Humain</i> , 82(2), 129. https://doi.org/10.3917/th.822.0129
71	Chadalavada, R. T., Andreasson, H., Schindler, M., Palm, R., & Lilienthal, A. J. (2020). Bi-directional navigation intent communication using spatial augmented reality and eye-tracking glasses for improved safety in human–robot interaction. <i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i> , 61(July 2019), 101830. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101830 .

Bicalho, L. E. A., Albuquerque, M. R., Ugrinowitsch, H., da Costa, V. T., Parma, J. O., dos Santos Ribeiro, T., Lage, G. M. (2019). Oculomotor behavior and the level of repetition in motor practice: Effects on pupil dilation, eyeblinks and visual scanning. *Human Movement Science* **64**, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.001>

Biondi, F. N., Saberi, B., Graf, F., Cort, J., Pillai, P., Balasingam, B. (2023). Distracted worker: Using pupil size and blink rate to detect cognitive load during manufacturing tasks. *Applied Ergonomics* **106**, 103867. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103867>

Brisson, J., Mainville, M., Mailloux, D., Beaulieu, C., Serres, J., Sirois, S. (2013). Pupil diameter measurement errors as a function of gaze direction in corneal reflection eyetrackers. *Behav Res* **45(4)**, 1322–1331. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0327-0>

Carter, B. T., Luke, S. G. (2020). Best practices in eye tracking research. *International Journal of Psychophysiology* **155**, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010>

Carvalho, A. V., Chouchene, A., Lima, T. M., Charrua-Santos, F. (2020). Cognitive Manufacturing in Industry 4.0 toward Cognitive Load Reduction: A Conceptual Framework. *Applied System Innovation* **3(4)**, 55. <https://doi.org/10.3390/asi3040055>

Eckert, M., Habets, E. A. P., Rummukainen, O. S. (2021). Cognitive Load Estimation Based on Pupillometry in Virtual Reality with Uncontrolled Scene Lighting, in: 2021 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). Presented at the 2021 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 73–76. <https://doi.org/10.1109/QoMEX51781.2021.9465417>

Harris, D. (2019). 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. Springer.

Influence of information overload on operator's user experience of human-machine interface in LED manufacturing systems | SpringerLink [WWW Document] (n.d.). URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-015-0352-0> (accessed 9.8.22).

Information | Free Full-Text | Eye-Tracking Studies of Web Search Engines: A Systematic Literature Review [WWW Document] (n.d.). URL <https://www.mdpi.com/2078-2489/11/6/300> (accessed 9.8.22).

Kaczorowska, M., Wawrzyk, M., Plechawska-Wójcik, M. (2020). Binary Classification of Cognitive Workload Levels with Oculography Features, in: Saeed, K., Dvorský, J. (Eds.), Computer Information Systems and Industrial Management, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, 243–254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47679-3_21

Klaib, A. F., Alsrehin, N. O., Melhem, W. Y., Bashtawi, H. O., Magableh, A. A. (2021). Eye tracking algorithms, techniques, tools, and applications with an emphasis on machine learning and Internet of Things technologies. *Expert Systems with Applications* **166**, 114037. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114037>

Lv, J., Qiao, J., Wu, J. (2020). Mental Fatigue Assessment Method Based on Assembly Operation. <https://doi.org/10.2991/AEBMR.K.200306.057>

Mele, M. L., Federici, S. (2012). Gaze and eye-tracking solutions for psychological research. *Cogn Process* **13 Suppl 1**, S261–265. <https://doi.org/10.1007/s10339-012-0499-z>

Moray, N. (2013). *Mental Workload: Its Theory and Measurement*. Springer Science & Business Media.

Nandakumar, N., Arularasu, M., Sivaprakash, P. (2014a). Real time assessment of stress level of workers in factories by measuring their eye parameters. *International Journal of Applied Engineering Research* **9**, 21449–21457.

Nandakumar, N., Arularasu, M., Sivaprakash, P. (2014b). Real time assessment of stress level of workers in factories by measuring their eye parameters. *International Journal of Applied Engineering Research* **9**, 21449–21457.

Nandakumar, N., Arularasu, M., Sivaprakash, P. (2014c). Real time assessment of stress level of workers in factories by measuring their eye parameters. *International Journal of Applied Engineering Research* **9**, 21449–21457.

NIEMANN, J., FUSSENECKER, C., SCHLÖSSER, M., OCAKCI, E. (2021). THE WORKERS PERSPECTIVE – EYE TRACKING IN PRODUCTION ENVIRONMENTS. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS – Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING* **64(1-S1)**.

Reischl, C., Ganster, H., Schneeberger, M., Pszeida, M., Lodron, G., Pechstädt, K., Spitzer, M., Reischl, C. (2021). Towards Large-Scale Evaluation of Mental Stress and Biomechanical Strain in Manufacturing Environments Using 3D-Referenced Gaze and Wearable-based Analytics. *Electronic Imaging* **33**, 1–7. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2021.6.IRIACV-310>

(PDF) A comparison of four methods for cognitive load measurement [WWW Document] (n.d.). URL https://www.researchgate.net/publication/241622665_A_comparison_of_four_methods_for_cognitive_load_measurement (accessed 9.8.22).

Plass, J. L., Moreno, R., Brünken, R. (2010). *Cognitive Load Theory*. Cambridge University Press.

Preprocessing pupil size data: Guidelines and code | SpringerLink [WWW Document] (n.d.). URL <https://link.springer.com/article/10.3758/s13428-018-1075-y> (accessed 9.8.22).

Reiner, M., Gelfeld, T. M. (2014). Estimating mental workload through event-related fluctuations of pupil area during a task in a virtual world. *International Journal of Psychophysiology, Applied Neuroscience: Functional enhancement, prevention, characterisation and methodology*. (Hosting the Society of Applied Neuroscience) **93**(1), 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.11.002>

Richardson, D., Spivey, M. (2008). *Eye-Tracking: Characteristics and Methods*. <https://doi.org/10.1201/b18990-101>

Rosch, J. L., Vogel-Walcutt, J. J. (2013). A review of eye-tracking applications as tools for training. *Cogn Tech Work* **15**(3), 313–327. <https://doi.org/10.1007/s10111-012-0234-7>

Salvucci, D. D., Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols, in: *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications, ETRA '00*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 71–78. <https://doi.org/10.1145/355017.355028>

Sensors | Free Full-Text | Measuring Cognition Load Using Eye-Tracking Parameters Based on Algorithm Description Tools [WWW Document] (n.d.). URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/912> (accessed 9.8.22).

Škvareková, I., Pecho, P., Ažaltovič, V., Kandra, B. (2020). Number of Saccades and Fixation Duration as Indicators of Pilot Workload. *Transportation Research Procedia, INAIR 2020 – CHALLENGES OF AVIATION DEVELOPMENT* **51**, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.009>

Tokuda, S., Palmer, E., Merkle, E., Chaparro, A. (2009). Using Saccadic Intrusions To Quantify Mental Workload. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* **53**, 809–813. <https://doi.org/10.1518/107118109X12524442637660>

Using Gaze Behavior to Measure Cognitive Load | SpringerLink [WWW Document] (n.d). URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01087-4_9 (accessed 9.8.22).

Van Acker, B. B., Bombeke, K., Durnez, W., Parmentier, D. D., Mateus, J. C., Biondi, A., Saldien, J., Vlerick, P. (2020). Mobile pupillometry in manual assembly: A pilot study exploring the wearability and external validity of a renowned mental workload lab measure. *International Journal of Industrial Ergonomics* **75**, 102891. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102891>

William, J., Muruges, R. (2020). Potential Eye Tracking Metrics and Indicators to Measure Cognitive Load in Human–Computer Interaction Research. *Journal of scientific research* **64**, 168–175. <https://doi.org/10.37398/JSR.2020.640137>

Wu, L., Zhu, Z., Cao, H., Li, B. (2016). Influence of information overload on operator’s user experience of human–machine interface in LED manufacturing systems. *Cogn Tech Work* **18**(1), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0352-0>