

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Informatica per il Management

**L'EYE TRACKING WEBCAM-BASED
A SUPPORTO DEI TEST
DI USABILITÀ**

Relatore:

Chiar.mo Prof.

ANGELO DI IORIO

Presentata da:

ELISA ANDRIANI

Sessione III

Anno Accademico 2022-2023

Indice

Introduzione	1
1 L'Usabilità	3
1.1 Il concetto di usabilità	4
1.1.1 I principi Fondamentali di Progettazione	7
1.1.2 Importanza dei test di usabilità	9
1.2 Metodologie di valutazione	10
1.2.1 Metodi tradizionali	12
1.3 Metodi remoti	12
1.4 Metodologie a confronto: tradizionali e remote	13
2 L'Eye tracking	15
2.1 Cos è l'eye tracking	16
2.2 Principi di funzionamento	19
2.3 Metodi, metriche e misurazioni	24
2.4 Applicazioni dell'eye tracking	28
3 L'Eye tracking webcam-based	31
3.1 Strumentazione e tecnologie utilizzate	32
3.1.1 La calibrazione	34
3.1.2 Le condizioni di illuminazione	36

3.2	Esplorazione delle soluzioni presenti sul mercato	37
3.3	Raccolta dati e analisi	43
3.3.1	Affidabilità e Validità	45
3.3.2	La Privacy	47
4	Contributi nei test di usabilità	49
4.1	Casi di studio nella letteratura	50
4.2	Eye Tracking Webcam-Based: Pro e Contro nei Test di Usabilità	56
	Conclusioni	61
	Bibliografia e Sitografia	65

Introduzione

Questa ricerca fornisce un'analisi sull'impiego di software di Eye-tracking remoti, basati su webcam, nel contesto delle attività di testing delle User Interface. In particolare, esplora e valuta queste tecnologie di tracciamento oculare come supporto per i test di usabilità svolti a distanza, evidenziando gli ambiti di applicazione, vantaggi e limitazioni, costi, diffusione e contributi nel miglioramento delle interfacce utente.

Negli ultimi decenni del XX secolo con la diffusione del processo di digitalizzazione, l'interazione tra uomo e tecnologia ha subito una trasformazione significativa. Viviamo in un contesto storico in cui dispositivi digitali e applicazioni si integrano alla nostra vita quotidiana, sotto molteplici aspetti. La diversificazione continua dei dispositivi informatici ha sollevato sfide per garantire interfacce accessibili, usabili ed efficaci, per soddisfare le diverse esigenze di un'ampia tipologia di utenti e per ottenere successo in un mercato sempre più competitivo.

L'evoluzione delle tecnologie, in particolare le avanzate capacità delle webcam integrate nei laptop e nei dispositivi mobili, nonché l'ampia diffusione del lavoro da remoto, ha aperto nuove prospettive nello studio del comportamento umano online. Tra le varie metodologie a disposizione per valutare a distanza le prestazioni dell'User Experience progettata, l'eye-tracking remoto è una prospettiva promettente per l'acquisizione di dati sul comportamento visivo. Negli ultimi anni, la possibilità di condurre esperimenti di tracciamento oculare, direttamente attraverso le telecamere basate su luce naturale, ha suscitato un vivo interesse nel campo della ricerca. Questa metodologia offre un

accesso senza precedenti alla comprensione delle scelte e dell'attenzione visiva degli utenti durante la navigazione sui siti web. In questo contesto, la presente tesi si propone di esaminare in che misura le tecniche che applicano il tracciamento oculare remoto, basato su telecamere non specializzate, siano efficaci strumenti di analisi visuale ed esplora le implicazioni che ne possono derivare.

La struttura della tesi è articolata in quattro capitoli. Il primo capitolo è devoluto all'usabilità, in tale sezione vengono esaminati in dettaglio i tratti distintivi di quest'ultima, i precursori degli studi in questo ambito, nonché il significato cruciale della sua valutazione al fine di perfezionare le interfacce digitali. Vengono esplorate le principali modalità di testing, sia remote che in laboratorio e se ne chiarisce un confronto. Il secondo capitolo delinea l'eye tracking, esaminandone le radici storiche, le metodologie operative, le metriche di analisi, le loro rappresentazioni visive e le ampie applicazioni in svariati contesti disciplinari. Il terzo capitolo si concentra sull'eye tracking basato su webcam, investigando il funzionamento degli algoritmi di riconoscimento, le modalità di calibrazione e i vincoli relativi alla luce passiva e ai movimenti della testa. Vengono esaminate diverse risorse come tool e software open source disponibili, soluzioni gratuite e proprietarie a pagamento. Si analizza l'interpretazione dei dati raccolti e si valuta l'affidabilità degli algoritmi considerando l'accuratezza e la precisione dei dati acquisiti. Nel quarto e ultimo capitolo, vengono presentati studi che hanno impiegato l'eye tracking basato su webcam per valutare l'usabilità delle interfacce. Successivamente, si conduce una discussione che esamina i vantaggi e gli svantaggi di questo approccio metodologico combinato con i test di usabilità.

Capitolo 1

L'Usabilità

La diffusione dei dispositivi digitali nella vita quotidiana ha posto sfide per interfacce efficaci. In questo primo capitolo si introduce il concetto di usabilità al fine di avere un quadro maggiormente chiaro, relativo all'analisi delle interfacce tramite diverse metodologie. Tra queste in tempi recenti emerge il tracciamento oculare remoto, che sfrutta le webcam integrate, in quanto offre un'accessibilità unica allo studio del comportamento visivo online, scostandosi dai tradizionali metodi di valutazione, che verranno indicati nelle pagine seguenti.

L'Usabilità trae le sue origini dai primi studi ergonomici in ambito militare, durante la Prima e Seconda Guerra Mondiale con la progettazione di armi letali maneggevoli e di facile utilizzo [1], ma il termine "Usabilità" fa la sua comparsa con la necessità di rendere i Personal Computer accessibili e fruibili anche dagli utenti non addetti ed esperti. Durante gli anni '80, quando i primi PC iniziavano a spuntare sulle scrivanie di impiegati e dipendenti, l'incapacità di affrontare bug e problematiche che potevano emergere durante l'utilizzo causava notevoli frustrazioni. Queste prime esperienze evidenziarono l'importanza dell'usabilità come strumento prima per valutare e poi per migliorare l'interazione tra l'uomo e la tecnologia, nel campo dell'Human-Computer Interaction (HCI).

Così tra gli anni 80' e 90' l'usabilità inizia ad essere riconosciuta come una disciplina scientifica grazie al lavoro di pionieri come Don Norman e Jakob Nielsen che con il suo testo "Usability Engineering", nel 1993 portò questo campo di studio all'attenzione di un vasto pubblico nell'ambito dell'informatica. Secondo la visione di Nielsen, l'obiettivo dell'ingegneria dell'usabilità è facilitare l'interazione, creare sinergie e stabilire un equilibrio tra le capacità cognitive degli utenti e le potenzialità dei sistemi informatici, rendendo il processo di connessione tra questi due aspetti più fluido e armonioso [2]. Uno dei principali obiettivi di sviluppatori e progettisti diventò la creazione di prodotti complessi pensati anche per l'utente comune. Tuttavia, è alla fine degli anni 90' con la diffusione di Internet, che l'usabilità non è più un valore aggiunto ma diventa un fattore e requisito fondamentale per qualsiasi prodotto o servizio digitale. Il contesto è completamente cambiato, l'usabilità è al centro della creazione di interfacce web di successo. In questo scenario, in costante innovazione, l'usabilità si afferma come un potente strumento di business, un fattore strategico per ottenere successo aziendale e vantaggi competitivi nel mercato. Tuttavia, nonostante il suo contributo promettente, è rimasta a lungo una risorsa sottoutilizzata nel settore IT [3].

1.1 Il concetto di usabilità

Il concetto di usabilità si è progressivamente evoluto in una definizione di "qualità d'uso" del sistema, prodotto, servizio che rappresenta, mettendo in primo piano il suo impatto sull'esperienza dell'utente (User Experience, UX). È essenziale, ora, delineare questa nozione per chiarire il suo contributo nelle fasi di progettazione e validazione di un prodotto a base informatica. L'usabilità è stata descritta in diversi modi, secondo un sondaggio condotto su 442 professionisti dell'esperienza utente, gli intervistati concordano sull'importanza della definizione fornita dall' International Organization for Standardization (ISO) [4]. La norma ISO 9241-11, del 1998 intitolata "Ergonomic requirements for

office work with visual display terminals (VDTs)” - ”Part 11: Guidance on usability” affina la prospettiva individuata dallo standard ISO/IEC 9126¹ e definisce l’usabilità come ”il grado in cui un prodotto può essere usato da specifici utenti per raggiungere specifici obiettivi con efficacia, efficienza e soddisfazione in uno specifico contesto d’uso.” È una definizione più operativa, che fornisce una guida per quantificare l’usabilità attraverso tre dimensioni. Scompono il concetto in tre variabili indipendenti: efficacia, efficienza e soddisfazione degli utenti, le quali collaborano per fornire una valutazione più globale [5].

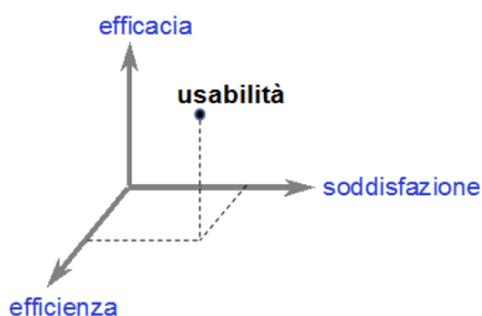


Figura 1.1: Le tre dimensioni dell’usabilità secondo la ISO 9241.

1. L’ **Efficacia** rappresenta “l’accuratezza e la completezza con la quale gli utenti raggiungono obiettivi specifici” riguarda il livello di successo con cui gli utenti ottengono i risultati desiderati, contenendo il rischio di esiti negativi.
2. L’**Efficienza** si riferisce alla “quantità di risorse spese in relazione all’accuratezza e alla completezza con cui gli utenti raggiungono gli obiettivi”, ovvero lo sforzo

¹Lo standard ISO/IEC 9126-1 noto come ”Software Engineering - Product Quality” pubblicato nel 1991, riconosce l’usabilità come attributo critico legato alla qualità del software, in particolare alla ”capacità del software di essere compreso, appreso, usato e gradito dall’utente quando usato in determinate condizioni”.

richiesto all'utente per completare un compito, quantificato sotto forma di tempo speso, operazioni effettuate, tasti premuti, ecc.

3. La **Soddisfazione** è descritta come “il comfort e l'accettabilità dell'utilizzo” e “l'assenza di disagio e atteggiamento positivo verso l'uso del prodotto”. È l'aspetto più soggettivo e rappresenta quanto l'utente ha apprezzato l'interfaccia in termini di facilità d'uso e intuitività.

Ma la misurazione di queste tre variabili non rappresenta l'unico modo per stimare l'usabilità.

Jakob Nielsen una delle massime autorità della web usability, nel 1993 dimostra che l'usabilità è parte della questione più ampia dell'accettabilità del sistema, introducendo un modello in cui l'usabilità è strettamente collegata al concetto di utilizzabilità (Usefulness) e complementare al concetto di utilità (Utility)².

In modo più specifico, Nielsen afferma che l'usabilità non è una proprietà unidimensionale di un'interfaccia utente ma si compone tradizionalmente da 5 attributi:

- **Apprendibilità:** la facilità con cui gli utenti portano rapidamente a termine un'operazione di base, sin dal primo utilizzo del sistema;
- **Efficienza:** una volta appreso il design del sistema, è il livello di produttività ottenibile nell'utilizzarlo;
- **Memorabilità:** la facilità degli utenti di ricordare il funzionamento del sistema per utilizzarlo nuovamente dopo periodi di inutilizzo;

²In [6] "Dove l'utilità è la questione se la funzionalità del sistema in principio può fare ciò che è necessario, e l'usabilità è la questione di quanto bene gli utenti possono utilizzare quella funzionalità. Affermando che la Usefulness di un prodotto richiede l'ottimizzazione di due parametri qualitativi, l'Usability e L'Utility, riassume il concetto in questa formula: Usefulness = Utility + Usability".

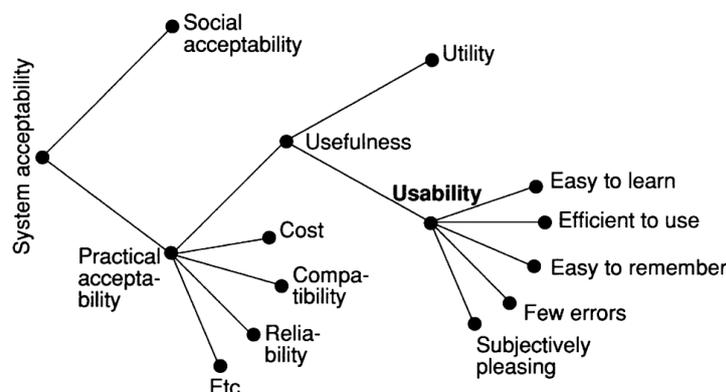


Figura 1.2: Diagramma del Modello di Usabilità di Nielsen.

- **Errori:** la capacità del sistema di ottenere un basso tasso di errori, supportando gli utenti in modo da fargli compiere pochi errori durante l'utilizzo e per aiutarli eventualmente a recuperare facilmente;
- **Soddisfazione:** la misura soggettiva in cui l'utente considera il sistema piacevole da usare.

1.1.1 I principi Fondamentali di Progettazione

L'obiettivo costante della ricerca in Human-Computer Interaction, in ambito Usabilità è migliorare l'esperienza umana attraverso il design. I requisiti sopra menzionati, nel corso della ricerca, si sono concretizzati in principi fondamentali che forniscono un quadro ingegneristico per l'analisi, il miglioramento e l'ottimizzazione della progettazione delle interfacce utente.

Donald Norman è uno dei professionisti per eccellenza dell'approccio antropocentrico, fondatore della moderna psicologia cognitiva è noto per i suoi contributi nel campo del design centrato sull'utente. Il termine "User-Centered" viene coniato nei suoi laboratori negli anni '80 e proietta i suoi studi sull'ottica che la tecnologia creata in modo

tale da essere basata sulle capacità cognitive umane è utilizzabile. Ed è grazie ai suoi due libri: *User-Centered System Design lays a foundation of research results* (1986)[7] e *The Design of Everyday Things* (1988)[8] che combatte la frustrazione dell'utilizzo quotidiano di sistemi complessi, ponendo l'attenzione sui bisogni, le potenzialità e i limiti dell'essere umano, nella sua individualità e diversità [9]. In merito al suo contributo [8], Norman elabora 7 principi fondamentali per la progettazione UX, basilari per il lavoro dei progettisti:

1. **Visibilità:** L'utente dovrebbe essere in grado di determinare le azioni che può compiere e quale è lo stato del dispositivo. Definire quindi le funzioni in modo chiaro e rilevante.
2. **Feedback:** Restituire all'utente informazioni complete e continue sui risultati delle azioni e sullo stato del servizio.
3. **Modello concettuale:** Il design deve mostrare tutte le informazioni per dare all'utente la possibilità di creare un buon modello concettuale del sistema. Portando l'utente a comprensione e a una sensazione di controllo.
4. **Affordances:** Sfruttare le affordances progettando elementi in un modo che suggerisca naturalmente il suo scopo o funzione. È un attributo di un oggetto che consente all'utente di riconoscere come usarlo senza bisogno di istruzioni.
5. **Segnali:** L'interfaccia comunica all'utente quali azioni sono possibili e come dovrebbero essere eseguite attraverso indicatori percepibili, facilitando il recupero delle informazioni dalla memoria.
6. **Mappature:** Si riferisce alla relazione tra i controlli e i risultati che producono. Il "mapping" funge da ponte che collega i modelli mentali degli utenti agli elementi di design con cui interagiscono.

7. **Vincoli:** Sono limiti fisici, logici, semantici e culturali che guidano le interazioni possibili all'utente.

La transizione dal lavoro di Norman alla riformulazione dei principi da parte di Nielsen, rappresenta una progressione significativa nel campo del design e dell'usabilità. Mentre i principi di Norman hanno fissato i fondamenti, le 10 Euristiche di usabilità di Nielsen (1994) hanno fornito agli esperti di usabilità uno strumento più dettagliato per valutare e migliorare le interfacce utente [10]. A 30 anni dall'uscita di queste linee guida, oggi sono più che mai attuali, enfatizzando l'importanza di coinvolgere l'utente nel processo di sviluppo. E fare in modo che esso sia in grado di fare uso del prodotto come previsto e con uno sforzo minimo per imparare a usarlo. L'usabilità non è più solo un concetto astratto, ma diventa un approccio metodologico per i progettisti. Nasce l'usabilità come professione.

1.1.2 Importanza dei test di usabilità

Il numero di professionisti che negli ultimi 100 anni si sono specializzati nel campo della User Experience (UX) e che si stima raggiungerà nel 2050, 100 milioni di persone nel mondo, è un valore significativo che riflette il valore crescente del settore [11] ed è la misura in cui da molti anni, sempre più aziende fanno UX. Società come Amazon, Google, eBay e Twitter scelgono di investire sui test di usabilità per massimizzare i tassi di conversione, numeri di traffico, le prestazioni dell'utente, quindi la soddisfazione del cliente e di conseguenza i profitti [12]. E' la pressione del web che ha riconosciuto l'impatto diretto sui ricavi aziendali, poiché in qualsiasi momento i visitatori possono decidere di abbandonare un sito web e cercare alternative, spesso presso i concorrenti. L'usabilità rappresenta qualità, costituisce un elemento chiave della pratica industriale per la differenziazione dei prodotti e sulla percezione del marchio. Investire in test di usabilità in fase di sviluppo significa anticipare e correggere problematiche potenziali, contribuendo a risparmiare tempo e risorse, diminuendo i costi dell'assistenza clienti e aumentando la

produttività delle economie avanzate. Il miglioramento medio dei parametri aziendali dopo una riprogettazione dell'usabilità era nel 2008 dell'83% [11].

1.2 Metodologie di valutazione

Teoricamente, valutare l'usabilità di un prodotto significa misurare la distanza cognitiva tra due concetti chiave: il "design model", ossia il modello del prodotto e delle sue modalità d'uso elaborate dal progettista e lo "user model", ovvero il modello di funzionamento del prodotto che l'utente si costruisce autonomamente durante l'interazione con lo stesso. Quanto più i due modelli sono vicini, tanto meno l'usabilità è un problema [8]. Negli ultimi trent'anni sono stati condotti numerosi studi di ricerca che cercano di superare i problemi di usabilità dei sistemi software. Ciò che è derivato da tali studi è stato lo sviluppo di un'ampia varietà di metodi di valutazione [13]. Un sondaggio condotto da UXPA International (su 625 esperti da 31 paesi) fornisce uno dei quadri più completi sull'uso delle diverse tecniche di valutazione dell'esperienza utente adottate dai professionisti nel 2022. La panoramica rivela che i test di usabilità sono tra gli approcci più diffusi nell'ambito professionale, coinvolgendo, lo scorso anno, al 77% sviluppatori e progettisti [14], posizionandosi al secondo posto solo dopo le ricerche sugli utenti, quali interviste e sondaggi, che sono state condotte dall'84% degli specialisti.

La popolarità dell'Usability testing è ancor più evidente grazie alla frequente combinazione con altri metodi come gli studi non moderati. È noto infatti quanto sia importante raccogliere dati sull'utente durante compiti specifici di interazione con un sistema o un'interfaccia, ad esempio effettuare una registrazione video o memorizzare il linguaggio del corpo [15] come nel caso del tracciamento oculare.

Il grafico confronta quattro metodi di valutazione utilizzati dagli esperti della user experience: i Test di Usabilità, che coinvolgono la raccolta di dati osservando gli utenti

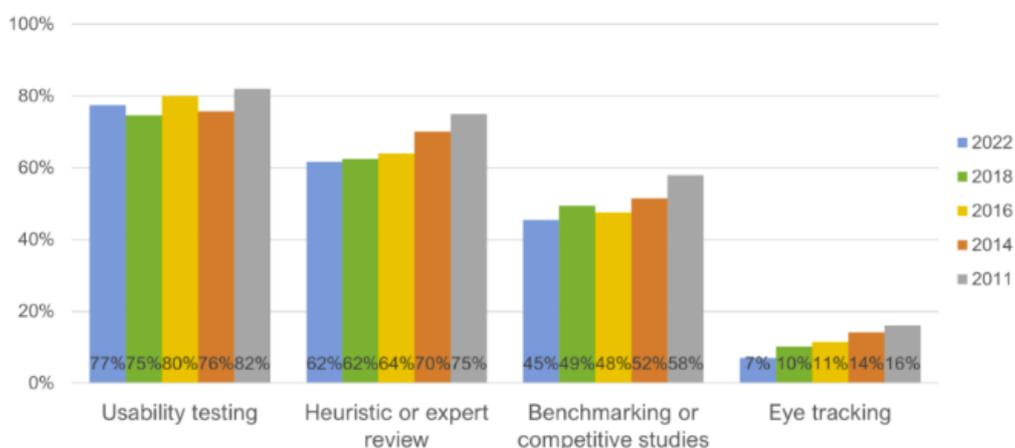


Figura 1.3: percentuali di metodi più utilizzati dal 2011 al 2022 [14]

durante compiti specifici; la Valutazione Euristica, in cui gli esperti identificano problemi di usabilità basandosi su principi fondamentali; gli studi di Benchmarking, che confrontano le prestazioni di un prodotto con quelli di altri simili sul mercato; e l'Eye tracking, che monitora i movimenti degli occhi degli utenti per comprendere la focalizzazione visiva e le modalità di navigazione.

Quest'ultimo rimane un metodo di nicchia. Sebbene il tracciamento oculare sia diventato molto più economico negli ultimi dieci anni, il suo utilizzo ha registrato una tendenza al ribasso passando dal 16% nel 2011 al 7% nel 2022. Il suo utilizzo più limitato potrebbe riflettere il tempo e la formazione considerevoli necessari per includere il tracciamento oculare. Tuttavia, è importante notare che i test di usabilità che continuano o iniziano ad incorporare l'eye-tracking nella loro analisi, ottengono più valore acquisendo dati più accurati e completi sulle prestazioni dell'interazione uomo-sistema. Integrare questi approcci avanzati non solo arricchisce l'analisi dei risultati del test di usabilità, ma contribuisce anche a ottenere feedback più approfonditi sul comportamento degli utenti, offrendo una prospettiva più completa del rapporto tra essi e il sistema o l'interfaccia in esame.

1.2.1 Metodi tradizionali

I test di usabilità tradizionali sono un processo di indagine in cui vengono assegnati compiti e attività realistiche molto specifiche o molto aperte, a un campione di utenti finali, da eseguire interagendo con un'applicazione o un prototipo. Sono condotti in ambienti di laboratorio attrezzati all'osservazione diretta di un moderatore. L'esperto in una stanza di controllo si occupa di registrare le sessioni, seguire e annotare comportamenti e riflessioni ad alta voce degli utenti (metodo Think-Aloud [16]). Successivamente i dati raccolti guidati da specifiche quantitative quali il tempo impiegato, il tasso di completamento, gli errori commessi, le difficoltà riscontrate e le reazioni degli utenti vengono esaminati per individuare aree di miglioramento e ottimizzare l'interfaccia utente.

1.3 Metodi remoti

Le possibilità offerte dalla tecnologia Internet, all'inizio degli anni '90, hanno spinto la comunità di ricerca e le aziende a esplorare e adottare studi di usabilità remota [17]. Una valutazione di usabilità a distanza, può essere definita come uno studio in cui il valutatore svolge osservazione e analisi in una posizione geografica e/o momento temporale diverso rispetto a quello dell'utente, e la connessione di rete funge da mezzo per estendere i test oltre il laboratorio, in normali ambienti di lavoro o domestici [18]. I test di usabilità remoti generalmente si distinguono tra moderati e non moderati [19]. I primi hanno molto in comune con i test tradizionali, sono sincroni ma a distanza, in questo caso le maggiori piattaforme di videoconferenza (Zoom, Microsoft Teams, Skype), intervengono come meccanismo di condivisione schermo e per trasportare dati audio/video in tempo reale. I secondi si distinguono per la capacità di raccogliere feedback in modo autonomo e automatizzato. Gli operatori devono occuparsi solamente di inviare il materiale necessario per mettere i partecipanti in condizione di svolgere il test e poi analizzare i risultati ottenuti [20].

La tecnologia utilizzata nei primi anni '90 era vincolata all'installazione di specifiche applicazioni lato client, limitandone così l'adozione su diversi sistemi operativi. Richiedevano inoltre l'accesso al codice sorgente del sito web e non permettevano la registrazione di audio o video. Molti studi non interagivano in alcun modo con il prodotto testato né erano coinvolti nella raccolta del tracciamento degli eventi, talvolta fornivano esclusivamente finestre di controllo basate sul Web per guidare il partecipante attraverso le attività [21].

L'attuale automatizzazione dei test di usabilità remoti asincroni è stata raggiunta con il progresso tecnologico e con l'introduzione di HTML5 nel 2014 e di JavaScript ES6 nel 2015, che hanno permesso la diffusione di nuovi strumenti avanzati ampliando notevolmente le possibilità di raccogliere dati quantitativi e qualitativi, alcuni di questi sono Loop11, Lookback , Userlytics , UserTesting , eGLU-Box PA, Preely [17][20].

Preely è citato come strumento web-based rappresentativo, per approfondire le potenzialità dei test di usabilità remoti, studia l'esperienza utente attraverso domande pre-programmate e attività di interazione direttamente con prototipi, come wireframe e mockup grafici. Preely è in grado di raccogliere dati qualitativi quali commenti liberi, le osservazioni e le opinioni degli utenti e dati quantitativi come il tempo impiegato per completare compiti specifici, la percentuale di compiti completati con successo, e la frequenza degli errori commessi dagli utenti, fornendo automaticamente agli esperti un rapporto con heatmaps dei click e feedback preziosi [20].

1.4 Metodologie a confronto: tradizionali e remote

I tradizionali test in laboratorio, sebbene funzionali, manifestano alcuni svantaggi, come la difficoltà di reperire utenti finali rappresentativi, il basso livello di automazione nel processo di valutazione e l'elevato dispendio di risorse in termini di tempo e costi. Alla luce del fatto che, le aziende che investono in usabilità, destinano il 10%, della quota

di risorse progettuali, nello sviluppo della user experience, il budget destinato a coprire anche il setup dell'ambiente di laboratorio, il reclutamento degli utenti e la formazione per istruire il personale a condurre i test, risulta ingente e fonte di svantaggio.

Per far fronte a queste problematiche infatti nascono i test di usabilità remoti che hanno notevoli vantaggi: i partecipanti possono essere facilmente reclutati poiché svolgono i compiti nel loro ambiente naturale con i propri computer, il che aumenta la validità ecologica e la disponibilità di utenti finali rappresentativi, culturalmente molto diversi. Inoltre, il test a distanza consente budget più ridotti poiché non ci sono costi per l'affitto del laboratorio e spese di viaggio per i partecipanti. Punto di forza è l'adattabilità di questi metodi remoti ai ritmi di progettazione e sviluppo di applicazioni e siti web che, al giorno d'oggi, si verificano in cicli sempre più brevi [22].

Sebbene l'efficienza delle due tipologie di test è la stessa, la più scarsa capacità dei test remoti nel rilevare i problemi di usabilità più importanti, può derivare da alcuni fattori come l'influenza della mancanza di un supervisore, la larghezza di banda limitata e i ritardi di comunicazione o le prestazioni dei dispositivi di cui ha disponibilità l'utente [22]. La sfida principale interessa la difficoltà di leggere i dati raccolti secondo delle specifiche oggettive, la questione cruciale riguarda la misurabilità dei dati quantitativi con metriche concrete. Infatti gli studi pubblicati in ambito "test di usabilità remoti asincroni" sono ancora limitati e le piattaforme che standardizzano gli studi sono tuttora in fase di sviluppo, perché la loro disponibilità è spesso associata a sottoscrizioni di abbonamenti e costi elevati. Ragione per cui una tappa evolutiva nella valutazione remota dell'usabilità potrebbe essere l'ausilio dell'eye-tracking remoto che combinato agli strumenti di monitoraggio dei test di usabilità interverrebbe nel generare una panoramica sui dati più oggettiva e ampia.

Capitolo 2

L'Eye tracking

Il capitolo precedente ha evidenziato la tecnologia di tracciamento oculare come metodologia promettente per migliorare la qualità dei test di usabilità remoti.

I primi studi sui movimenti oculari [23] suggeriscono che l'osservazione riflette i processi cognitivi e l'elaborazione cosciente degli utenti (l'ipotesi Eye-Mind) [24], assumendo che esiste una fitta relazione tra ciò che guarda l'occhio e i meccanismi attenzionali in cui è impegnata la mente. Ma in *Eyetracking Web Usability*, Nielsen e Pernice affermano che guardare non sempre significa comprendere [25], ciò può essere dovuto a diversi fattori, come la distrazione, la complessità dell'interfaccia o la mancanza di chiarezza nel design, risulta pertanto di fondamentale interesse non basare completamente l'analisi dell'usabilità solo sui dati dell'eye tracking, ma di integrare le tecnologie di tracciamento con i più tradizionali test di usabilità.

L'eye tracking costituisce uno studio significativo nel più ampio contesto dell'esplorazione della mente umana, poiché circa l'80% di tutte le impressioni sensoriali vengono trasmesse al cervello attraverso il canale visivo [26].

2.1 Cos è l'eye tracking

L'eye-tracking emerge come alleato per offrire una panoramica accurata delle interazioni visive degli utenti con sistemi e interfacce, per ottenere insight che vanno oltre le metriche quantitative dei test di usabilità. Il campo di studio dell'oculometria, noto come eye tracking, rappresenta una tecnica mediante la quale i movimenti oculari di un individuo vengono registrati in modo da fornire un insieme ricco e dinamico di informazioni [27]. Il tracciamento dei movimenti oculari è impiegato per analizzare i punti di fissazione dell'occhio e identificare con adeguata precisione le aree in cui un utente concentra la sua attenzione [28]. I dati di tracciamento oculare forniscono criteri oggettivi per la valutazione dell'esperienza dell'utente [29], svelando gli elementi chiave, le preferenze visive e gli ostacoli percettivi. Evidenziando punti di forza e di criticità delle interfacce, i designer e gli sviluppatori possono riprogettare e migliorare l'interazione per soddisfare i requisiti di usabilità [30].

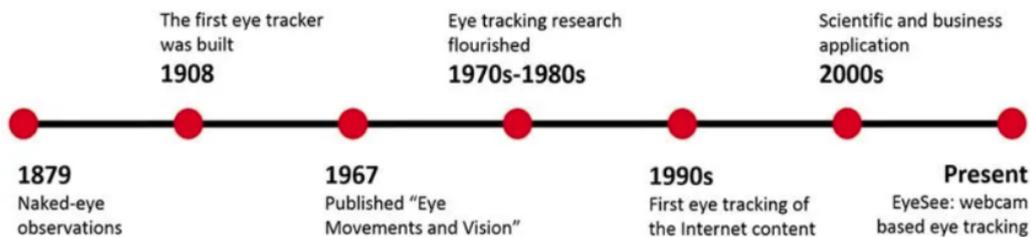


Figura 2.1: Una breve storia dell'eye tracking [31].

Nonostante l'eye tracking possa apparire una tecnologia moderna, le sue origini precedono di circa 100 anni la diffusione dei computer [32]. La sua storia inizia nel 1879 quando l'oftalmologo francese Louis Émile Javal avviò i suoi studi basati sull'osservazione visiva diretta. Più precisamente, le prime tecniche di eye tracking si basavano sulla semplice introspezione e sull'osservazione ad occhio nudo dei processi di lettura, mediante l'uso di specchi posizionati sopra le pagine lette dagli intervistati. Queste metodologie

evidenziarono che le persone non leggono in modo fluido. Piuttosto si fermano su alcune parole mentre si muovono rapidamente attraverso altre. Questi approcci pionieristici, limitati dalla precisione e dalla memoria dello sperimentatore, gettarono le basi per il primo progresso significativo, l'ideazione di dispositivi meccanici in grado di registrare permanentemente e oggettivamente le scansioni visive [33].

Edmund B. Huey fu uno dei precursori in questo campo, sviluppando una tecnica di acquisizione meccanica. Una lente a contatto diretto con la cornea, fissata a un puntatore in alluminio, che si spostava in risposta ai movimenti dell'occhio. Un metodo così invasivo, che lo studioso ricorse a narcotizzare i partecipanti dei test per ridurre il loro disagio durante l'esperimento. Notò che il numero di scatti sembrava dipendere più dalla natura specifica dell'articolo letto piuttosto che dall'ampiezza descritta dalla rotazione dell'occhio [34].

Solo nel 1901, Dodge e Cline idearono il primo preciso e non invasivo metodo di eye tracking ottico, che registrava su una lastra fotografica fotosensibile, la luce riflessa dalla cornea. Questo metodo ha posto le basi teoriche sulle quali si fonda tutta la letteratura successiva in materia di eye tracking.

Durante la prima metà del XX secolo molti altri ricercatori combinarono la riflessione corneale con le innovazioni emergenti nel campo cinematografico, per esaminare ciò che fino a questo punto nessuno era riuscito a misurare accuratamente: la velocità e la dimensione verticale dei movimenti oculari. Questo comprendeva l'applicazione di tecniche fotografiche per studiare i modelli di movimento, prima e dopo aver manipolato caratteri, dimensioni, elementi tipografici e layout delle pagine. Inoltre, si sperimentò l'impiego di telecamere del cinema per approfondire i movimenti degli occhi dei piloti mentre utilizzavano i comandi e gli strumenti della cabina di pilotaggio in fase di atterraggio. Questa è ritenuta la prima concreta applicazione nell'ambito dell'attuale "ingegneria dell'usabilità".

Nel 1948, Hartridge e Thompson introdussero il primo sistema di eye-tracking indossabile

sulla testa, sebbene molto grezzo, consentirono a tutti gli studi successivi di liberarsi dal vincolo di immobilizzare la testa dei partecipanti durante i test. Negli anni successivi, la tecnologia si è evoluta per diventare sempre più accessibile e meno invasiva.

Tra gli anni '50 e '60, fu di grande riferimento il lavoro svolto dallo psicologo russo Alfred L. Yarbus. I suoi studi sul tracciamento oculare mostrarono che la direzione dello sguardo è cruciale nell'interattività, poiché poteva rivelare informazioni preziose sul processo di comprensione. Si scopre che il movimento e la fissazione degli occhi dei tester dipendono dal loro interesse e dal compito assegnato, quindi dal problema che il soggetto deve affrontare e dalle informazioni che spera di ottenere dall'immagine [23].

Negli anni '70 emerse in modo decisivo la complessità e l'importanza del processo di analisi dei dati raccolti. Come dichiarato da Monty nel 1975, era frequente dedicare giorni interi all'elaborazione di dati, la cui raccolta richiedeva solo pochi minuti [35].

Mentre gli ingegneri si dedicavano a migliorare i sistemi di tracciamento oculare remoto, per ottenere dati leggibili in tempo reale (negli studi precedenti, l'analisi poteva essere condotta solo dopo lo sviluppo della pellicola), gli psicologi operavano nel campo dei fattori umani e dell'usabilità, dando origine a rilevanti intuizioni circa le relazioni tra il nostro sistema visivo e i processi percettivi e cognitivi sottostanti [36].

La diffusione dei Personal Computer, negli anni '80, permise ai ricercatori di incorporare i tracciatori oculari, basati su video, nel campo di studio della Human-Computer Interaction [37], per studiare la comunicazione tra uomo e macchina.

In risposta alle esigenze del mercato, all'evoluzione tecnologica e a diversi fenomeni socio-economici, l'eye tracking trovò applicazione in nuove discipline, in particolare nel campo dell'usabilità [26]. Diversi studi impiegarono la tecnologia eye tracking per analizzare come gli utenti interagiscono con i comandi nei menu dei computer. I team di marketing iniziarono a integrare l'eye tracking per valutare l'efficacia degli annunci e determinare quali sezioni delle pagine delle riviste venivano effettivamente visualizzate [32].

Negli anni '90 si innescò un rapido avanzamento della tecnologia di tracciamento oculare,

un progresso strettamente legato al crescente interesse industriale e alle sempre maggiori capacità dei computer di elaborare dati elettronici. Le imprese cominciarono a impiegare tali dispositivi per analizzare e studiare come gli utenti interagiscono con le informazioni sul World Wide Web, valutando l'attenzione visiva su banner, grafica animata e strumenti di navigazione.

Oggi, hardware e software di eye-tracking sono progettati per condurre ricerche anche in ambienti diversi dai tradizionali laboratori, estendendo la loro utilità a contesti caratterizzati da condizioni meno controllate. Grazie alla portabilità raggiunta da questa tecnologia, è ora possibile integrarla direttamente nei dispositivi mobili e portatili. Questa versatilità consente l'applicazione in una vasta gamma di settori e contesti, spaziando dai giochi per PC al settore delle vendite al dettaglio, passando per l'industria automobilistica e la realtà virtuale. Si stima che entro il 2025, il mercato dell'eye-tracking raggiungerà un valore di 1,75 miliardi di dollari [38].

2.2 Principi di funzionamento

Uno studio recente [39] indaga i movimenti naturali dell'uomo, analizzandone la persistenza nell'ambiente digitale. Esamina se lo sguardo segue il cursore, in modo analogo a quando, nell'ambiente fisico, l'occhio segue la mano durante lo spostamento di un oggetto. Questo modello di coordinazione si dimostra attendibile per comprendere le interazioni uomo-macchina.

Il controllo oculomotorio umano è un processo estremamente efficiente che consente al cervello di comporre una rappresentazione dettagliata dell'ambiente circostante, nonostante l'ingente flusso di stimoli visivi a cui l'individuo è esposto ogni giorno. Il controllo dello sguardo si basa su una frenetica attività di movimenti accoppiati e coordinati degli occhi e del capo. La visione umana si compone di due parti, la visione foveale, una piccola area centrale ad alta risoluzione che copre solo 2° del campo visivo, e la visione

periferica a risoluzione scadente che rappresenta il resto del campo visivo [25]. Per ricostruire un'immagine nitida, l'occhio umano compie rapidissimi micro spostamenti, 3-4 volte al secondo, definiti saccadi, sugli elementi d'interesse, per ridirezionare lo sguardo sulla fovea, l'area della retina più rappresentata nella corteccia visiva. Durante questi brevi e veloci movimenti degli occhi, il cervello blocca temporaneamente l'elaborazione visiva per evitare che l'immagine in movimento risulti sfocata e inconsistente, rendendoci effettivamente ciechi [40]. Questo alternarsi di scatti e pause definisce il sistema di fissazioni e saccadi [25]. Le fissazioni sono i momenti stazionari in cui la fovea è fissa sull'elemento di interesse, hanno una durata compresa tra un decimo e mezzo secondo, in base al compito da svolgere [40]. In risposta a uno stimolo visivo, le fissazioni diventano saccadi cioè l'occhio si muove, con una velocità di 900° , fino a concentrare di nuovo l'attenzione su un'area.

I dispositivi di tracciamento oculare presentano diversi parametri chiave che influenzano la loro precisione, il costo e le potenziali applicazioni. La risoluzione spaziale si riferisce alla capacità del sistema di distinguere dettagli di piccole dimensioni. La risoluzione temporale, espressa in frequenze come "0-20 Hz", determina la velocità con cui il sistema campiona i movimenti oculari nel tempo. La possibilità di registrare movimenti verticali e torsionali fornisce una visione completa del comportamento oculare. Il tempo di configurazione del dispositivo e la scelta tra un sistema a contatto o senza contatto influenzano l'usabilità pratica. Il livello di rumore nelle misurazioni indica la presenza di segnali indesiderati [41].

Nel corso della storia sono state elaborate principalmente quattro tipi di tecniche per le acquisizioni di eye-tracking:

- elettro-oculografia (EOG),
- lenti a contatto rigide,

- oculografia a infrarossi,
- video-oculografia (VOG).

L'elettro-oculografia è ancora oggi di rilevante interesse in quanto consente di monitorare i movimenti degli occhi anche quando sono chiusi, risultando particolarmente utile per studi condotti durante il sonno. Gli elettrodi attaccati alla pelle intorno agli occhi registrano la differenza di potenziale tra la cornea (con carica positiva) e la retina (con carica negativa), ossia tra la porzione anteriore e posteriore del bulbo oculare. Una tecnologia ormai obsoleta nell'uso umano, perché troppo invasiva, è la bobina oculare sclerale. Un sistema che genera un campo magnetico impiegando lenti a contatto modificate, con una piccola bobina elettromagnetica inserita sulla sclera dell'occhio. I fasci infrarossi (IR) o vicini all'infrarosso (NIR) funzionano invece quantificando l'intensità della luce infrarossa riflessa dalla sclera dell'occhio tra una coppia di sensori. Mediante il monitoraggio delle fluttuazioni di luminosità in questa zona, si registrano le modifiche della posizione degli occhi. È un metodo invasivo perché è necessario utilizzare un vetro sferico per posizionare la sorgente luminosa e il sensore vicino all'occhio [42].

La maggior parte dei moderni eye tracker impiegano l'oculografia basata su video (VOG), che rappresenta la tecnologia attualmente più diffusa. Questa metodologia può essere suddivisa in due categorie principali: non invasiva (screen-based) e invasiva (indossabile). Nel caso non invasivo, i dispositivi sono autonomi e possono essere posizionati a distanza, collegati a un computer portatile o a un monitor. Al contrario, la variante invasiva coinvolge dispositivi indossabili, tipo occhiali, che integrano l'eye tracker direttamente nella montatura [42]. Diversi studi classificano come "remoti" i dispositivi di tracciamento oculare in ragione della loro non invasività. In tempi più recenti, la terminologia è stata principalmente associata ai dispositivi basati su webcam, argomento chiave del successivo capitolo. La video-oculografia si avvale di fonti di luce infrarossa o visibile, come nel caso degli eye tracker webcam-based, noti anche come Passive Eye-tracking Technologies (PET) che sfruttano esclusivamente l'illuminazione naturale dell'ambiente,

quindi passiva e non controllata dall'eye tracker [43]. Gli eye tracker che attualmente utilizzano il metodo della riflessione corneale/centro della pupilla, impiegano luce a infrarossi diretta verso l'occhio, al fine di generare un riflesso sulla cornea, noto come Corneal Reflection (CR) [44]. Una camera near-infrared mette a fuoco uno o entrambi gli occhi e rileva questo riflesso per inviarlo al software di image-processing dell'eye-tracker. Questi software si distinguono per l'utilizzo di algoritmi specifici, spesso brevettati, che generalmente mirano a calcolare la direzione del vettore ottenuto dall'angolo tra il riflesso sulla cornea e il centro della pupilla [45].

Questo processo di calcolo è essenziale per ottenere una valutazione accurata dei movimenti oculari in modo indipendente dalla posizione e dai movimenti della testa [44].

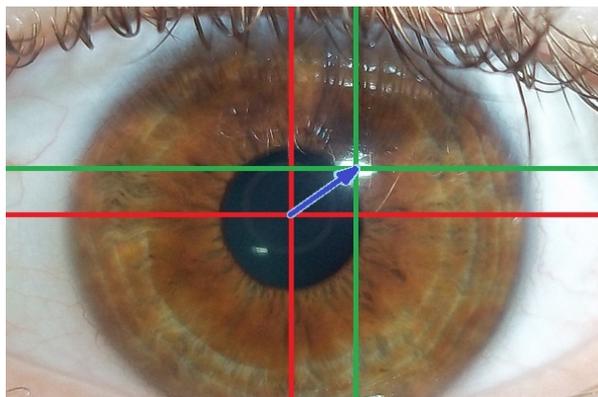


Figura 2.2: Luce visibile: centro dell'iride (rosso), riflessione corneale (verde) e vettore di uscita (blu) [46].

La qualità dell'acquisizione è influenzata dall'accuratezza e dalla precisione. L'accuratezza rappresenta la differenza media tra i dati dello sguardo reali e quelli misurati in gradi dell'angolo visivo. La precisione segnala quanto bene un eye tracker può riprodurre gli stessi risultati per una serie di misurazioni ripetute nella stessa posizione [44]. Diversi fattori possono compromettere la qualità del dato, come ciglia molto scure, lenti a contatto rigide, aree di ombra attorno alla pupilla o un occhio semichiuso. Di conseguenza, è essenziale eseguire una calibrazione all'inizio di ogni sessione di eye-tracking. Questo

processo garantisce che il sistema di tracciamento degli occhi sia accurato e in grado di interpretare con precisione il punto esatto sullo schermo su cui lo sguardo è concentrato. I fornitori in genere forniscono software per rendere la configurazione e la calibrazione relativamente facili e veloci. La taratura prevede il posizionamento di target visivi in posizioni note sullo schermo, per consentire al dispositivo di mappare i movimenti oculari con coordinate specifiche dello spazio bidimensionale del display [47].

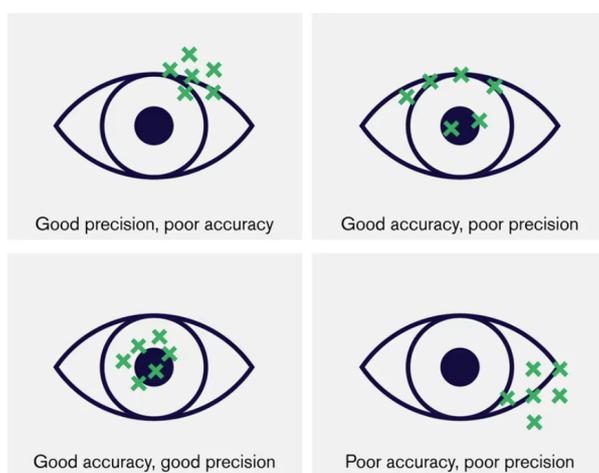


Figura 2.3: La qualità di un'acquisizione viene quantificata in precisione e accuratezza.

La velocità di acquisizione di un eye-tracker è espressa in termini di frequenza, che può essere misurata in frame per secondo (fps) o in Hertz (Hz). I valori tipici variano dai 30 ai 2000 Hz. Una frequenza di campionamento elevata, offre informazioni più dettagliate con dati di qualità superiore, apre la possibilità di ricercare più caratteristiche dei movimenti oculari, come microsaccadi o altri movimenti fissativi. Ad esempio, se si considera un movimento oculare che dura 50 millisecondi. Una fotocamera da 20 fotogrammi al secondo è esattamente sufficiente per catturare il movimento completo, ma la possibilità di farlo è molto piccola. Per acquisire effettivamente il movimento oculare completo, l'eye tracker dovrebbe essere in grado di catturare più fotogrammi del movimento.

2.3 Metodi, metriche e misurazioni

A seconda della frequenza di campionamento e della durata della sessione, si possono rapidamente accumulare molti dati. Estrarre dati significativi dalle sessioni di ricerca costituisce un'attività estremamente intensa. Ormai del tutto automatizzata da software di analisi forniti dai produttori o dai laboratori di ricerca [32].

L'associazione COGAIN (Communication by Gaze Interaction) fornisce un catalogo aggiornato degli eye tracker attualmente disponibili (vedere [48]). Classificati in tracciamento dello sguardo open source, tracciamento oculare gratuito e tracciamento oculare a basso costo. Tra i principali fornitori di tecnologie di eye tracking domina sicuramente Tobii, ma altri attori rilevanti sono EyeTribe, Eyegaze, Gazepoint, Smart Eye, SensorMotoric Instruments, Pupil Labs e molti altri.

Ma è importante sottolineare che non esistono standard che in maniera inequivocabile definiscono le metriche di una fissazione. Quindi l'interpretazione delle misurazioni dell'eye tracking è un processo strettamente legato al tipo di algoritmo di rilevamento automatico e ai parametri impostati [32]. Le metriche sono dati di terzo ordine, ovvero dati ottenuti dal software dell'eye-tracking, dopo aver eseguito pulito il primo output, ovvero il dato grezzo (come le coordinate spaziali di ciascun punto di sguardo, la dimensione fisica della pupilla, il numero di battiti di ciglia e altri dati biometrici) [44]. Le metriche di eye-tracking più comunemente utilizzate negli studi di usabilità sono [43]:

- **Numero di fissazioni** su ogni area di interesse: questa metrica è strettamente correlata al concetto di AOI (Area of Interesting), un elemento del display che è di particolare interesse per il team di ricercatori. Gli studiosi hanno proposto che la frequenza di fissazione possa essere utilizzata come misura dell'importanza di un display [32]. Quindi un maggior numero di fissazioni in una determinata area indica che questa è ritenuta più attrattiva di altre o più significativa dall'utente.
- **Numero di fissazioni globali**: sono quelle complessivamente rilevate. Un numero

elevato di fissazione rispetto alla complessità del compito potrebbe rappresentare una cattiva disposizione degli elementi di visualizzazione.

- **Durata della fissazione:** una durata di fissazione più lunga descrive problemi relativi alla difficoltà di estrazione e interpretazione delle informazioni richieste.
- **Tempo della prima fissazione:** indica la quantità di tempo che impiega un soggetto test a guardare un AOI specifico dall'esordio dello stimolo. E soprattutto prodotti con una maggiore esperienza utente possono evocare un tempo più breve per la prima fissazione.
- **Tempo di permanenza:** è il tempo trascorso nella stessa posizione e area. Indica la quantità di tempo in cui un utente rimane su un risultato di ricerca dopo un clic.

I software proprietari che facilitano l'interpretazione e la gestione dei dati raccolti comunemente li traducono in diverse rappresentazioni visuali, così da poter osservare i movimenti oculari del soggetto in modo graficato.

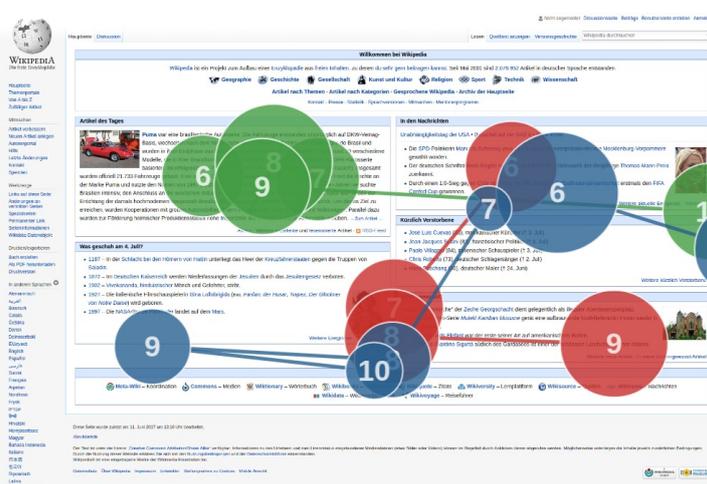


Figura 2.4: Esempio di grafico di tipo Gaze plot [49].

Il Gaze plot organizza i dati in modo dettagliato, fornisce informazioni come il posi-

zionamento dello sguardo, dove la dimensione dei cerchi è direttamente proporzionale alla durata delle fissazioni e all'interno di essi vengono presentati dei numeri, posizionati secondo l'ordine di visualizzazione dei diversi elementi che compongono lo stimolo osservato.



Figura 2.5: Esempio di grafico di tipo Heatmap [50].

La mappa termica, o di calore o Heatmap rappresenta la tecnica di visualizzazione preminente negli studi di eye tracking. In queste rappresentazioni, le zone "calde" o aree ad alta densità, di solito rosse, indicano i punti in cui gli utenti hanno concentrato il loro sguardo con una frequenza più elevata. Le regioni blu indicano una durata di messa a fuoco minore.

La tecnica definita Bee swarm richiama il movimento veloce dello sciame affollato delle api, infatti i dati vengono presentati sotto forma di piccoli puntini in movimento che simulano i puntamenti dello sguardo.

Infine, con i Cluster, i dati vengono aggregati e rappresentati attraverso poligoni di diverse dimensioni e forme in base ai punti di fissazione oculare dei vari partecipanti. In conclusione, la validità delle interpretazioni e rappresentazioni dei dati dipende interamente dagli strumenti forniti dai software di eye tracking. L'estrazione dei problemi



Figura 2.6: Esempio di grafico di tipo Bee Swarm.

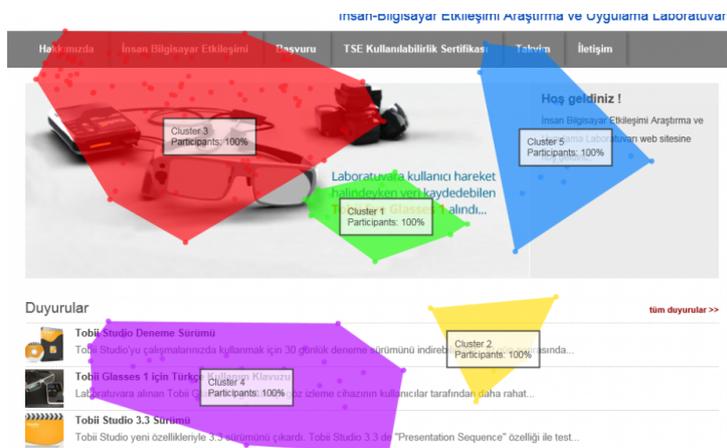


Figura 2.7: Esempio di grafico di tipo Cluster.

di usabilità non è un processo banale. Tipicamente si presume che l'occhio rimanga concentrato su ciò che sta elaborando, tuttavia, alcuni autori sottolineano che le correlazioni tra movimenti oculari e le metriche di performance del compito potrebbero non

essere così semplici come spesso suggerito in letteratura [51]. Le fissazioni potrebbero indicare diverse situazioni come difficoltà nell'estrarre informazioni, un aumento dell'attenzione cognitiva, calcoli mentali o noia dello sguardo [52]. Data l'assenza di protocolli e strumenti standardizzati, spesso le analisi avanzate richiedono applicazioni su misura e implementazioni specifiche caso per caso. Questa mancanza di uniformità introduce diversità negli approcci analitici e rende più complessi i confronti tra gli studi [44]. Una ricerca [53], che ha tentato di valutare questa relazione esaminando compiti uguali su più siti, ha mostrato che su un totale di 149 problemi di usabilità riscontrati, si sono registrati 23 modelli di movimento oculare [54]. La prospettiva è l'identificazione automatizzata o semiautomatica e la categorizzazione dei "modelli" di movimento oculare al fine di fornire informazioni sull'efficacia dei progetti di interfaccia in modo efficiente e standardizzato [27].

2.4 Applicazioni dell'eye tracking

Le applicazioni di eye tracking possono essere classificate in due categorie principali: interattive e diagnostiche. Nelle applicazioni interattive, i dati di tracciamento oculare vengono utilizzati per la comunicazione uomo-macchina, utilizzando quindi gli occhi per la navigazione e i controlli. Al contrario, nelle applicazioni diagnostiche, l'obiettivo principale è comprendere come il sistema visivo umano opera [55]. Le prospettive nell'ambito di ricerca scientifica e di opportunità per l'applicazione commerciale continuano ad ampliarsi, fornendo grandi benefici a diverse aree di indagine come: Medicina, Psicologia, Marketing, Pubblicità, Ingegneria Industriale, Sport e Giochi [55].

In campo medico numerosi studi hanno indagato la natura di diversi tipi di patologie, identificando malattie mentali tipo schizofrenia, psicosi e disturbo bipolare. E in base alle diverse metodologie sperimentali (Compito pro-saccadico, Compito antisaccadico, Compito di inseguimento regolare, Compito di ricerca visiva) è stato possibile diagnosti-

care anche deterioramento cognitivo, malattia di Alzheimer, sclerosi multipla, autismo, morbo di Parkinson, disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD) [56]. Tuttavia, ci sono anche lavori in cui il tracciamento oculare viene utilizzato per altri scopi, come la terapia, come tecnologia assistiva per migliorare la qualità della vita o per il miglioramento della formazione medica [56].

Nel settore del marketing e della pubblicità l'eye tracking è utilizzato per comprendere le azioni dei consumatori e i loro processi decisionali di acquisto. Ottenere dati attraverso la valutazione dell'interesse nei confronti del marchio, del packaging e del design degli annunci pubblicitari, nonché dell'attrattiva delle funzionalità e dei prodotti sugli scaffali, insieme all'analisi della facilità o difficoltà di navigazione nel negozio, sia in ambienti tridimensionali che bidimensionali (come ad esempio gli e-commerce), mira a ottenere informazioni di valore per migliorare la competitività aziendale [57]. Con la crescente diffusione del commercio elettronico, le esperienze di acquisto dei consumatori si sono differenziate da quelle vissute nei negozi fisici, la presentazione visiva è la variabile più decisiva, di conseguenza numerose aziende come PepsiCo, Pfizer, P&G e Unilever hanno utilizzato questa tecnologia per formulare strategie di vendita sia in America che in Europa [58].

Nell'ambito della formazione, l'utilizzo del tracciamento oculare emerge come strumento a supporto per l'insegnamento e-learning a distanza, consentendo di monitorare la distrazione degli studenti e di guidarli verso un maggiore livello di attenzione. Inoltre, si è esplorata la possibilità, in un contesto ideale in cui l'integrazione del software è agevole e il costo dell'eye tracker è contenuto, di introdurlo nei contesti educativi tradizionali. L'obiettivo sarebbe personalizzare l'esperienza di apprendimento, adattandola alle specifiche esigenze dello studente in termini di carico cognitivo e presentazione dei dati [59]. Una prospettiva più futuristica proietta l'applicazione dell'eye tracking oltre i confini convenzionali, introducendo la possibilità di utilizzare il tracciamento oculare nel controllo e nella navigazione in ambienti virtuali, per esempio nel campo della neuro-architettura,

un campo emergente che fornisce una base empirica per le scelte progettuali fatte dagli architetti [60].

Capitolo 3

L'Eye tracking webcam-based

Le ragioni per cui l'eye tracking remoto ha guadagnato popolarità negli ultimi anni possono ricondursi alla sua accessibilità, convenienza e facilità d'uso rispetto all'hardware tradizionale di tracciamento oculare [61] ed in parte, possono essere attribuite anche alle esigenze generate dalla pandemia di COVID-19, periodo in cui numerosi ricercatori si sono orientati verso metodologie online [62]. La ricerca sperimentale in laboratorio ha subito un rallentamento, poiché i test in presenza non erano più praticabili e non si poteva attendere il lancio di strumenti alternativi. La rapida necessità di adattarsi ha portato all'utilizzo di strumenti già esistenti, ma precedentemente sottoutilizzati. Il 2021 ha visto un inaspettato incremento nell'uso di piattaforme di conferenza virtuale (Skype, Zoom, Microsoft Teams e altri), consentendo alle persone di interagire comodamente dalle proprie abitazioni. Parallelamente, questa trasformazione ha rappresentato un'opportunità per le tecnologie di eye tracking basate su video, in grado di catturare e registrare i movimenti oculari da remoto [43]. In questo contesto, si ricercano evidenze sull'efficacia di tali approcci, al fine di valutare se attualmente siamo pronti per la loro adozione.

Il Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA) del 2023 [63] ha messo in luce i recenti progressi sul tracciamento oculare remoto, basato su webcam. È stato

manifestato, per esempio, l'interesse crescente nello sviluppo di metodi non invasivi per la diagnosi precoce della malattia di Alzheimer (AD) attraverso il tracciamento dello sguardo, utilizzando dati raccolti con una webcam [64]. Anche lo studio vincitore del COGAIN 2023 Best Paper [65], che propone GazeCast, un nuovo sistema che sfrutta i dispositivi mobili portatili degli utenti, ha evidenziato il crescente interesse verso una prospettiva di utilizzo e ricerca accademica.

Mentre il campo dell'eye tracking tradizionale è stato sviluppato nel corso di più di un secolo, la metodologia webcam-based è un ambito ancora nuovo e in gran parte inesplorato. Nella letteratura, gli eye-tracker sono definiti “remoti” se i loro componenti non richiedono alcun fissaggio al corpo dell'utente, integrandosi generalmente con gli schermi dei computer per monitorare gli occhi dell'utente da una certa distanza [55]. In questo punto della ricerca, il termine “remoto” non è adottato per definire una distanza fisica, ma per delineare il tracciamento oculare, basato sulla comune telecamera, integrata nella maggior parte dei notebook in commercio, condotto online. Questo approccio basato su webcam è il più riconosciuto per gli studi di usabilità [66].

3.1 Strumentazione e tecnologie utilizzate

Il tracciamento oculare basato su webcam si serve delle videocamere integrate nei dispositivi come laptop, tablet e smartphone o esterne come webcam USB montate su monitor. I driver essenziali per il funzionamento della webcam sono spesso preinstallati nel sistema operativo del dispositivo o facilmente scaricabili al primo impiego, agevolando notevolmente sia il processo di configurazione che l'utilizzo. Questo aspetto semplifica l'integrazione delle webcam, con i software dedicati, nei contesti di tracciamento oculare, consentendo una notevole compatibilità tra il riconoscimento hardware della webcam e l'implementazione delle sue funzionalità avanzate. La prontezza all'uso rende accessibile

e fruibile questa tecnologia anche per chi non ha competenze avanzate in campo informatico, gli utenti possono concentrarsi direttamente sull'utilizzo della webcam senza dover affrontare configurazioni complesse.

Le webcams nascono come semplici strumenti di input, progettati principalmente per soddisfare le esigenze di base, delle comunicazioni virtuali (videochiamate, videoconferenze), perciò variano notevolmente in termini di qualità a seconda del produttore e del modello. Tuttavia, presentano una serie di caratteristiche comuni che spaziano dalla risoluzione video alla velocità di fotogrammi, fino alla qualità dell'immagine in condizioni di scarsa illuminazione. I modelli di webcam più avanzati spesso offrono funzionalità come l'autofocus, la correzione automatica del colore e la riduzione del rumore. Generalmente l'eye tracking webcam-based è in grado di catturare dettagli entro un angolo visivo di $4,16^\circ$ (accuratezza spaziale) e registrare un numero di 60 fotogrammi al secondo (limite attuale di risoluzione temporale) [62]. La risoluzione della webcam non solo influisce sulla definizione dell'occhio catturato in termini di pixel, ma incide anche sul numero di fotogrammi al secondo e sulla latenza. In generale, una maggiore risoluzione potrebbe garantire un dettaglio superiore dell'occhio, ma al contempo potrebbe comportare un rallentamento del frame rate e un aumento della latenza [67]. In sostanza, per migliorare uno dei due parametri, l'altro deve peggiorare.

Al fine di contribuire alla comprensione approfondita della tecnologia di tracciamento oculare remoto webcam-based, una revisione della letteratura scientifica (Vedi Bibliografia), ha permesso di identificare i passaggi di base nel suo funzionamento. La maggior parte degli eye tracker basati su webcam, sono flussi video elaborati online [68], non in tempo reale. Il fulcro del funzionamento del tracciamento oculare si basa sull'acquisizione continua delle immagini del volto dell'utente come input, restituendo in output le coordinate precise sullo schermo, indicando la direzione in cui gli occhi dell'utente si sono rivolti. Inizialmente, si individua la posizione generale del volto, mediante robusti algoritmi di riconoscimento facciale, catturando i tratti caratteristici dai fotogrammi

del volto umano. Allo stato attuale, sono state sviluppate ed efficientemente utilizzate diverse librerie open source basate su browser per il rilevamento dei punti di riferimento facciali, tra cui Clmtrackr, Track.js, BeyondFaceReality, js-objectdetect, tracking.js, Face-api.js ecc. Successivamente, la procedura si concentra sull'estrazione delle regioni degli occhi all'interno del volto, in alcuni algoritmi vengono inclusi gli angoli degli occhi e le palpebre [69]. Poiché questi metodi di eye tracking non traggono alcun beneficio dalla luce dello spettro del vicino infrarosso, che consente all'algoritmo di rilevare con precisione la pupilla rispetto all'iride circostante, il riconoscimento degli occhi e delle pupille è ricavato esclusivamente dai feed video, piuttosto che dal riflesso corneale. Il processo comprende, inoltre, una fase preliminare di calibrazione che ottimizza la precisione complessiva del rilevamento. È fondamentale considerare l'orientamento della testa durante il rilevamento del volto, poiché qualsiasi inclinazione della fotocamera può compromettere la precisione e condurre a risultati errati.

3.1.1 La calibrazione

Il tracciamento di interfacce complesse e densamente informative può rappresentare una sfida notevole, specialmente quando si tiene conto dell'alta sensibilità ai movimenti della testa e ai cambiamenti nella posizione dell'utente rispetto alla fotocamera [58]. I ricercatori dedicano grande interesse ai processi di calibrazione, per sviluppare modelli di autoapprendimento che si basano sulla posizione dello sguardo dell'utente in coordinamento con le procedure di calibrazione.

Nel capitolo precedente si è già delineato il meccanismo di calibrazione esplicita, eseguita attivamente dall'utente, osservando punti target fissi sullo schermo. Qui si introducono alcuni studi con soluzioni differenti rispetto alle tradizionali attività di calibrazione. Una linea di ricerca [70] presenta un metodo per la calibrazione automatica delle stime dello sguardo in un contesto non calibrato, avvalendosi dei modelli di sguardo umano. Questo approccio si basa sull'assunzione che gli esseri umani manifestino schemi di sguardo

simili di fronte a uno stimolo, permettendo l'utilizzo dei modelli per anticipare i punti di sguardo di nuovi spettatori, senza richiedere una calibrazione attiva (viene semplicemente richiesto di guardare un'immagine per soli 3 secondi).

Un ulteriore studio [71] propone PACE un Personalized, Automatically Calibrating Eye-tracking system che identifica e raccoglie dati in modo discreto dagli eventi di interazione, tenendo conto delle preferenze e delle abitudini degli utenti. Si basa sull'analisi oculare/facciale dei dati della webcam per estrarre campioni di buon addestramento dai dati di interazione quotidiana. Questo approccio adattivo si ricalibra, si adatta e si migliora continuamente con l'uso.

Lo studio [72], basato sulla previsione della salienza dell'immagine, svolge la calibrazione in modo integrato durante il processo di addestramento del modello di previsione dello sguardo. Gli utenti partecipano a sessioni di gioco in cui sono chiamati a fissare specifici punti di calibrazione sullo schermo per un secondo ciascuno. L'acquisizione dei dati avviene utilizzando solo gli ultimi fotogrammi di ciascun punto di calibrazione per garantire stabilità. Successivamente, la correlazione incrociata normalizzata media zero (ZNCC) viene calcolata tra le immagini degli occhi associate a questi punti e la media di tutte le immagini. Le immagini con basso valore ZNCC, indicative di occhi chiusi o lampeggianti, vengono escluse. Il modello di previsione dello sguardo viene addestrato utilizzando le immagini rimanenti. Questo processo integrato semplifica la calibrazione, personalizzando il modello per le attività specifiche degli utenti e rendendo il sistema di previsione dello sguardo più efficiente.

Anche lo studio [73] propone un approccio senza necessità di calibrazione manuale, introducendo un sistema che importa un set di dati di addestramento prima dell'utilizzo. La registrazione dei dati sullo sguardo ogni minuto è cruciale per individuare l'area potenziale del bordo dello schermo attraverso l'analisi della densità di sguardo. L'ottimizzazione del sistema avviene confrontando il limite stimato con il reale bordo dello schermo e applicando il risultante fattore di errore, preparando così il sistema per il successivo ciclo

di utilizzo. In breve, questo studio presenta una soluzione che, grazie a un set di dati pre-aricchito, monitora costantemente lo sguardo, identifica e corregge automaticamente le possibili discrepanze con il bordo dello schermo, migliorando così la precisione nelle interazioni successive. SearchGazer si distingue per l'autocalibrazione in tempo reale tramite relazioni di interazione sguardo-mouse che avvengono naturalmente nella ricerca sul Web e non interrompono l'esperienza dell'utente [68]. Anche WebGazer [74] dopo la prima calibrazione a 9 punti, continuerà continuamente ad auto-calibrarsi utilizzando le informazioni raccolte dalle interazioni dell'utente come click o movimenti del cursore.

3.1.2 Le condizioni di illuminazione

A differenza dei sistemi con hardware dedicato che utilizzano illuminazione attiva nel vicino infrarosso, il tracciamento oculare con webcam non affidandosi a un componente hardware specifico, performante ed ad alte prestazioni, ricorre esclusivamente all'illuminazione passiva, presente nell'ambiente circostante. A causa della mancanza intrinseca di controllo di queste fonti di luce, nello spettro visibile, l'eye tracking remoto è altamente sensibile alle condizioni di illuminazione (cioè localizzazione, quantità e stato) e ai cambiamenti nella posizione degli utenti tester [62]. I riflessi nella cornea dell'utente risultano punti di riferimento poco oggettivi, che necessitano l'interpretazione di software speciali per elaborare la registrazione visiva, in output rilevanti per l'usabilità [66]. Le soluzioni attualmente disponibili sfruttano tecniche come il rilevamento dei punti di riferimento del volto e l'apprendimento automatico per prevedere le posizioni degli occhi degli utenti [75].

Come indicato precedentemente, la versatilità del metodo consente agli intervistati di partecipare all'esperimento da varie posizioni e con diverse fonti di illuminazione, sia naturali che artificiali, provenienti da diverse direzioni. Nonostante ciò, la densità delle informazioni raccolte e la complessità delle interfacce sollevano interrogativi riguardo al possibile impatto della direzione e del tipo di illuminazione sulle prestazioni del trac-

ciamento oculare remoto. L'eye tracking basato su webcam fonda la sua operatività sull'analisi delle immagini in cui risulta fondamentale la componente luminosa. Pertanto è fondamentale valutare come reagisce il tracciamento in funzione dei cambiamenti della fonte di illuminazione. Con riferimento alle conclusioni di un recente studio [58], è emerso che le misurazioni effettuate con l'illuminazione naturale sono più efficienti del 24% rispetto a quelle effettuate con l'illuminazione artificiale, si ritiene che ciò sia dovuto al fatto che l'illuminazione naturale ha una distribuzione più omogenea. È stato inoltre concluso, che durante la raccolta di dati su interfacce complesse, come ad esempio un sito di e-commerce con sezioni di oggetti posizionate a breve distanza l'una dall'altra (5-20px), è essenziale che la direzione della fonte di luce, indipendentemente dal tipo (naturale, artificiale) sia frontale e centrata. Questo risultato è motivato dallo spostamento prodotto, ovvero, la disposizione centrale minimizza la distanza tra il punto focale previsto e il punto in cui i partecipanti si sono concentrati più a lungo. Indipendentemente dalle condizioni di illuminazione, lo spostamento, di livello più basso, risulta comunque di 17,42 pixel. Pertanto, un elevato volume di informazioni, nelle interfacce complesse, potrebbe influire sulla precisione della stima dello sguardo. In questo studio, la tecnologia di tracciamento oculare basata su webcam si classifica promettente per condurre test di livello base [58].

3.2 Esplorazione delle soluzioni presenti sul mercato

Attualmente, si contano diverse alternative software per il tracciamento oculare remoto, con proposte di carattere gratuito o a pagamento. Tale diffusione ha contribuito a rendere il suo utilizzo più accessibile sia per la comunità accademica che per l'ambito commerciale. Tra le soluzioni disponibili figura GazeRecorder¹, un freeware sviluppa-

¹<https://gazerecorder.com/>

to dal ricercatore indipendente Szymon Deja nel 2016. GazeRecorder si presenta come un'applicazione desktop, con un'interfaccia utente minimalista e accessibile. Il suo utilizzo è limitato ad applicazioni non commerciali. L'installazione su pc è agevole, non richiede di eseguire passaggi di configurazione aggiuntivi ma nei requisiti è necessaria l'installazione di Microsoft .NET Framework, una piattaforma per la creazione di applicazioni avanzate. Gestisce la calibrazione e tramite l'ausilio di normali webcam registra dove gli utenti guardano e con cosa interagiscono sugli schermi dei loro computer. Diversi algoritmi di tracciamento all'avanguardia comunicano per identificare il volto, i tratti principali, gli occhi, l'iride e i movimenti nello spazio, consentendo il tracciamento più accurato possibile, anche quando le persone si muovono, l'illuminazione cambia o il viso è parzialmente ostruito. Al momento è possibile eseguire esperimenti della durata di un minuto. Al termine dell'esperimento si genera una cartella con le esportazioni video e i dati grezzi, quali fissazioni, saccadi e posizione della testa 3D. GazeRecorder offre, in aggiunta, l'elaborazione di mappe di calore, sia statiche che dinamiche, relative ai dati raccolti durante l'esperimento. La stessa società mette a disposizione una soluzione poco popolare, caratterizzata da un'elevata precisione, denominata Gaze Cloud API². È facilmente integrabile nel proprio sito web con poche righe di codice [76].

Da quanto sopra esposto, l'avanzamento di soluzioni caratterizzate da licenze gratuite e open source, rappresenta un significativo tentativo nel rendere questa tecnologia accessibile e fruibile a un pubblico più vasto. Tuttavia, le restrizioni legate alla richiesta di competenze specifiche in ambito di sviluppo rendono tale tecnologia adatta principalmente a una comunità di esperti, comprendente ricercatori e sviluppatori capaci di beneficiare delle sue potenzialità senza costi elevati. Questa evoluzione sta trasformando l'ambito dell'eye tracking webcam-based in un settore in competizione che necessita di maggiore visibilità per affermarsi contro le aziende predominanti nel mercato [77]. Open-

²<https://github.com/szydej/GazeCloudt>

CV (Open Source Computer Vision Library)³ è una libreria software open source per la visione artificiale e l'apprendimento automatico, sia per uso accademico che commerciale (ne fanno uso aziende come Google, Yahoo, Microsoft, Intel, IBM, Sony, Honda, Toyota). Dispone di oltre 2500 algoritmi ed è gestita dalla Open Source Vision Foundation senza fini di lucro. La combinazione di Python e OpenCV è popolare tra i professionisti per manipolare l'input da webcam. OpenCV è stata anche rimodellata come libreria JavaScript (opencv.js) per aumentare la compatibilità con i browser.

WebGazer.js⁴ è sviluppato sulla base della ricerca condotta dalla Brown University, è scritto interamente in JavaScript ed è tra le prime librerie di eye tracking che possono essere facilmente integrate in qualsiasi sito Web con solo poche righe di codice. È Open source e supportato dai principali browser, utilizza le comuni webcam già presenti nei laptop e nei dispositivi mobili per dedurre in tempo reale la posizione dello sguardo dei visitatori su una pagina web. Questa libreria di tracciamento oculare addestra vari modelli per stimare lo sguardo durante le interazioni dell'utente [74].

SearchGazer⁵, sviluppato da una parte dello stesso gruppo di ricercatori, estende WebGazer ed è specificamente focalizzato sull'identificazione delle aree di interesse sui motori di ricerca. Google e Bing sono attualmente gli unici motori di ricerca supportati. Gli sviluppatori affermano che la precisione non era l'obiettivo principale. SearchGazer viene utilizzato per creare mappe di calore di previsione sulle pagine dei motori di ricerca [68].

In accordo con l'analisi condotta da iMotions A/S, una società IT specializzata in software di ricerca sul comportamento umano [77], la presente discussione si concentra sul confronto tra i principali progetti gratuiti di riconoscimento dello sguardo menzionati nell'articolo. La selezione si focalizza specificamente sui sistemi compatibili con i diffusi

³<https://github.com/opencv/opencv>

⁴<https://github.com/brownhci/WebGazer>

⁵<https://github.com/brownhci/SearchGazer>

dispositivi di webcam standard (evidenziati in rosso nella figura). La tabella proposta presenta l'analisi di dieci dei software free più rilevanti di eye tracking, valutati in base a sette caratteristiche selezionate: supporto per webcam o eye tracker a infrarossi, registrazione in tempo reale, presentazione di stimoli, analisi dei dati, supporto continuo, integrazione multi-sensore e richiesta di conoscenze di programmazione. Questa visualizzazione cromatica fornisce un rapido e chiaro quadro delle prestazioni di ciascun progetto in relazione alle specifiche funzionalità considerate. Le caselle sono colorate in verde, giallo o rosso a seconda del livello di accessibilità alla caratteristica di riferimento.



Figura 3.1: Confronto di 10 software gratuiti per il tracciamento oculare [77].

xLabs⁶ nasce come startup dall'idea di ricerca e sviluppo di quattro fondatori che lanciano un software basato su JavaScript progettato per adattarsi a un'ampia gamma di settori. La loro tecnologia può essere fornita in tre modi: API, estensione del browser per Google Chrome e SDK C++. Il software funziona con qualsiasi webcam e offre un monitoraggio continuo e in tempo reale senza limitare i movimenti dell'utente. Rispetto ad altri eye tracker gratuiti, il software xLabs non è open source. La visione del codice sorgente è disponibile solo per i partner commerciali. Tra i suoi vantaggi, spiccano la facilità d'uso e la compatibilità con diverse piattaforme. Tuttavia, è importante sottolineare alcune limitazioni, come l'assenza di opzioni per l'analisi dei dati e l'attuale mancanza di supporto [77].

GazePointer⁷ è un software gratuito che utilizza una normale webcam per stimare la direzione dello sguardo e ti consente di spostare il cursore del mouse usando gli occhi. È semplice da installare e funziona su Windows. Le informazioni acquisite possono poi essere agevolmente passate ad altre applicazioni per integrare l'analisi dei dati.

Infine, OpenGazer⁸ è stato sviluppato otto anni fa come contributo per rendere più accessibile l'utilizzo del computer, originariamente supportato da Samsung e dalla Gatsby Charitable Foundation. Tutto il software è scritto in C++ e Python e richiede l'utilizzo del sistema operativo Linux [78]. Alcune delle soluzioni gratuite precedentemente menzionate non garantiscono l'opzione di analisi dati. Inoltre, gli studi esaminati hanno identificato due categorie principali di risultati utilizzati per valutare l'usabilità delle interfacce web. Il primo tipo di output significativo in numerosi studi consiste in dati semplici e grezzi, espressi sotto forma di serie temporali, destinati a essere mandati in pasto, come input, ad algoritmi di apprendimento automatico.

Il secondo genere di output consiste in dati visivi pronti all'uso e facilmente interpretabili

⁶<https://xlabsgaze.github.io/>

⁷<https://sourceforge.net/projects/gazepointer/>

⁸<https://github.com/opengazer/OpenGazer>

Method	Provider	Language	Description
Passive-light	Itracker	Python, Matlab	A CNN based eye tracker, which runs in real time (10–15 fps) on a modern mobile device
	RecurrentGaze	Python	Based on a fusion of CNN-RNN
	NNET	-	ANN based eye tracker implementation for iPad devices
	EyeTab	Python, C++	Webcam model-based approach for binocular gaze estimation
	Opengazer	C++, C	Based on the Viola-Jones face detector, that locates the largest face in the video stream capture from PC webcam
	TurkerGaze	JavaScript, HTML	A webcam-based eye tracking game for collecting large-scale eye tracking data via crowdsourcing
	Camgaze	Python	Binocular gaze estimation for webcam
	ITU gaze tracker	-	Based on remote webcam setup
	CVC ET	C++	Enhanced Opengazer with head repositioning feature which allows users to correct their head pose during eye tracker usage in order to improve accuracy.
	xLabs	-	Webcam-based eye tracker, built as a browser extension for Google Chrome.
	Gazepointer	C#, HTML	Windows-based web camera gaze estimation
	MyEye	-	Gaze-based input designed for use by people with amyotrophic lateral sclerosis (ALS), a neuromuscular disease.
	NetGazer	C++	Port of Opengazer for the Windows platform

Figura 3.2: Alcuni software di Eye Tracking remoto [79].

sotto forma di mappe di calore, fissazioni, punti di sguardo, aree di interesse e altri tipi di metriche. Questo tipo di output è solitamente generato da software specializzati, progettati per integrarsi con le librerie di tracciamento oculare che non implementano l'analisi dei dati [66]. Per migliorare l'affidabilità del tracciamento oculare con webcam, spesso si fa ricorso a queste piattaforme e tool online che implementano sperimentazioni con eye tracking, offrono soluzioni per il neuromarketing e la ricerca biometrica, interpretano le registrazioni visive per ottenere dati visuali significativi per l'usabilità.

Un esempio è EyeSee⁹, una società belga di ricerche di mercato che offre soluzioni commerciali online, occupandosi del reclutamento di partecipanti da diverse parti del mondo in base alle specifiche del target. Al termine della sessione il cliente riceve un report completo con l'analisi delle espressioni facciali, approfondimenti, raccomandazioni e dati di ricerca.

EyeSee insieme a RealEye, Eyeware, Eyezag, Eyevido rappresenta solo una parte delle piattaforme di ricerca online di eye-tracking che possono essere facilmente integrate in qualsiasi strumento esterno utilizzando un semplice reindirizzamento URL, senza la necessità di includere script o codici nei siti web. Molte di queste soluzioni di alto livello, a pagamento, offrono la possibilità di svolgere sessioni live, integrandosi perfettamente con software di terze parti come Zoom, Google Meet, MS Teams o altri.

3.3 Raccolta dati e analisi

La tecnologia di eye tracking basata su webcam, si affida principalmente a soluzioni software, un approccio che riduce notevolmente la dipendenza da hardware specializzato [72]. Sono numerosi gli algoritmi computazionali proposti per l'analisi delle immagini atti ad acquisire i dati dello sguardo. I metodi esistenti possono essere classificati in metodi basati sul modello e metodi basati sull'apparenza [80]. Il primo genera un modello geometrico tramite le caratteristiche 2D estratte dall'occhio, come il centro della pupilla, la posizione del riflesso corneale, gli angoli degli occhi, i contorni dell'iride, ecc.. Il processo parte da immagini tipicamente catturate in un ambiente controllato utilizzando sorgenti di luce infrarossa.

I metodi basati su modello utilizzano un modello predefinito o un insieme di regole per interpretare o riconoscere oggetti e scene. Queste funzionalità vengono utilizzate per

⁹<https://eyesee-research.com/>

adattare un modello 3D dell'occhio specifico per la persona per rilevare lo sguardo o per stimare direttamente lo sguardo utilizzando la regressione [81]. Mentre il secondo effettua una mappatura diretta tra i pixel grezzi e gli angoli dello sguardo. Si basano su caratteristiche visive di alto livello estratte direttamente dalle immagini RGB del viso e/o degli occhi per prevedere risultati come l'angolo dello sguardo e il punto dello sguardo. I metodi basati sull'apparenza utilizzano robusti modelli di machine learning per addestrare un modello per la previsione dello sguardo [81]. Questi ultimi hanno superato i metodi classici basati su modelli per la stima dello sguardo e trovano applicazione negli esperimenti scientifici online basati su webcam standard [80]. Inoltre, i recenti metodi di visione artificiale e deep learning applicano l'elaborazione delle immagini in tempo reale per apprendere dalle caratteristiche facciali osservate. E per ragioni legate all'assenza di luce infrarossa e per ridurre il tempo di elaborazione non si occupano di ricercare la pupilla, ma individuano l'area che comprende anche l'iride.

La scelta del modello dipende dall'applicazione specifica e dalla natura dei dataset disponibili [72]. Un'osservazione rilevante è che il tracciamento oculare basato su webcam solleva considerazioni legate alla quantità dei set di dati per l'addestramento, poiché le dimensioni ridotte di questi ultimi limitano il potenziale di addestramento di algoritmi ad alta intensità di dati e causano un adattamento eccessivo nella valutazione dei benchmark [72]. Per affrontare la carenza di dati, uno studio [72] ha adottato il tracciamento oculare basato su webcam con *TurkerGaze* per la raccolta di dati di eye tracking attraverso due interfacce di gioco sulla piattaforma di crowdsourcing Amazon Mechanical Turk. Questo approccio ha permesso di ottenere dati di tracciamento oculare su larga scala, coprendo una varietà di parametri chiave come il tipo di immagini o video scelti, la natura del compito assegnato agli utenti, la distanza del tester dallo schermo, il numero di soggetti e il numero di visualizzazioni per immagine.

Inoltre, la validità di tali metodi deve essere valutata per garantire che i risultati ottenuti riflettano fedelmente i movimenti oculari reali degli individui in condizioni naturali.

Tuttavia, come accade con l'introduzione di qualsiasi nuova metodologia, l'adozione del tracciamento oculare basato su webcam suscita legittime preoccupazioni riguardo alla sua precisione, accuratezza e validità complessiva.

3.3.1 Affidabilità e Validità

Le webcam indubbiamente più convenienti rispetto agli eye tracker commerciali, risultano inferiori in termini di prestazioni rispetto agli strumenti professionali, ma rappresentano un valido compromesso tra costo e capacità. Tuttavia, la tecnologia ha compiuto significativi progressi negli ultimi anni, agevolando il passaggio verso la ricerca online, trasferendo gli studi dai laboratori al web, sostituendo gradualmente l'hardware e il software di tracciamento oculare ad alto costo con alternative più convenienti, come le librerie open source e software sperimentali come approfondito precedentemente. Numerosi studi sulla validazione hanno condotto indagini confrontando i risultati ottenuti utilizzando le tecnologie di eye tracking a infrarossi e webcam standard. I risultati mostrano che la tecnologia della webcam ha raggiunto una precisione quasi paragonabile all'eye tracker a infrarossi però nel rilevamento delle fissazioni su immagini più grandi, suggerendo che il tracciamento oculare della webcam è una valida alternativa per determinati compiti [75].

Yang e Krajbich [82] hanno valutato il tracciamento oculare della webcam utilizzando il software WebGazer. Hanno testato la procedura con uno studio decisionale adattando il codice per ridurre la calibrazione e migliorare la risoluzione temporale (da 100-1000 ms a 20-30 ms). I risultati hanno mostrato risultati paragonabili a precedenti risultati in laboratorio per quanto riguarda la relazione tra sguardo e scelta con un piccolo degrado nella risoluzione spaziale e temporale. Hanno suggerito inoltre che potrebbero essere utilizzati fino a sei Aree di interesse (AOI) senza alcun degrado della qualità dei dati.

Un ulteriore esempio è la tecnologia PACE [71] che fa uso di un'applicazione desktop per monitorare lo sguardo attraverso una webcam, raggiungendo prestazioni e precisione

che si avvicinano a quelle degli strumenti professionali come Tobii X [66]. Tali approcci suggeriscono un miglioramento continuo delle prestazioni delle webcam, con la qualità sempre maggiore dell'hardware dei laptop diventa sempre più agevole supportare il tracciamento oculare in tempo reale [74]. Nonostante le limitazioni tecniche, la produzione di risultati meno precisi rispetto alle attrezzature specializzate e quindi la limitata applicabilità negli ambiti professionali, l'integrazione software opera per colmare tali lacune e renderle sempre più idonee alle applicazioni di tracciamento oculare. Infatti, oltre il 65% dei browser web supporta le funzionalità HTML5 per l'accesso alle webcam integrate.

Validare l'accuratezza significa garantire l'affidabilità del risultato, sostanzialmente verificare che tramite un algoritmo o metodologia scelta non si superi un limite soglia di errore (la deviazione mediana assoluta della distanza tra il bersaglio e la direzione dello sguardo, espressa in gradi o centimetri) che nel caso dello studio di validazione di WebET 3.0 è fissato a 5,5 gradi di accuratezza (DVA) come parametro per ottenere dati accettabili [83]. Nello studio di validazione di iMotion [83], il 70% delle risposte degli intervistati era inferiore a 3,0 DVA: livelli di precisione ritenuti superiori a qualsiasi altra piattaforma basata su webcam. WebGazer [74] ha segnalato un errore vicino a 2 centimetri e SearchGazer [68] ha riportato un errore di poco più di 2 centimetri. I dati raccolti da questi due metodi di eye tracking risultano essere sufficientemente affidabili per il monitoraggio dello sguardo della pagina web. XLabs invece segnala un errore medio di circa 3 centimetri, su uno schermo medio di un laptop, che è di circa 13 pollici, che rappresenta un errore di circa il 10% della dimensione dello schermo [84].

Nell'ambito della validazione dell'eye tracking online basato su webcam, si fa spazio uno studio [85] che stabilisce in che misura potrebbe essere un valido sostituto dell'eye tracking in laboratorio. L'integrazione di librerie open source come WebGazer.js ha permesso di replicare tre classici e robusti studi di tracciamento oculare (Cascade effect, Novelty preference e Visual world paradigm) eseguiti originariamente in un ambiente di laboratorio. I risultati di questa comparazione hanno sottolineato l'impatto della natura più

rumorosa del tracciamento oculare online sulla dimensione dell'effetto. Sostanzialmente le dimensioni dell'effetto di tutti e tre gli studi sono ridotte del 20-27% rispetto al tracciamento oculare in laboratorio. In conclusione, lo studio suggerisce che gli studi di eye-tracking, non richiedenti una precisione estrema, possono essere condotti in modo affidabile online attraverso l'impiego della webcam del partecipante. Tuttavia, errori medi con un angolo visivo medio di 4,17 dimostrano la fattibilità di WebGazer per approssimare lo sguardo in diversi contesti [74]. Ciò suggerisce che l'eye tracking a basso costo può diventare una valida alternativa, quando gli studi sull'usabilità non hanno bisogno di distinguere tra, ad esempio, parole particolari o voci di menu che i partecipanti stanno guardando, ma solo tra aree di interesse più ampie a cui prestano attenzione [86].

Permane una questione aperta riguardo al numero ottimale di AOI che possano essere impiegate efficacemente. Lo studio [82], adotta un approccio metodologico basilare, limitandosi all'uso di due AOI. Tuttavia, considerando la precisione spaziale fornita da WebGazer, la ricerca ipotizza la possibilità di implementare tra quattro e sei AOI senza compromettere l'integrità dei dati raccolti. Suggerisce, inoltre, che incrementando il numero di AOI, potrebbe verificarsi una sovrapposizione tra AOI adiacenti, lo sguardo diretto in un' AOI potrebbe iniziare a registrarsi in un'altra. Sebbene questa precisione sia inferiore a quella ottenibile in un ambiente di laboratorio controllato, si ritiene che possa essere adeguata per diverse applicazioni online.

3.3.2 La Privacy

Nell'ambito degli studi basati su webcam, la questione della privacy emerge come elemento di rilevante importanza. È fondamentale garantire la privacy e la sicurezza dei dati, poiché il tracciamento oculare raccoglie informazioni sensibili sul comportamento dell'utente. Nel consenso informato si sottolinea con chiarezza ai partecipanti che le immagini dei loro volti, acquisite tramite la webcam vengono elaborate esclusivamente in locale e non lasciano mai i loro dispositivi. Per esempio, l'output condiviso dall'algoritmo

WebGazer consiste unicamente nelle coordinate orizzontali (x) e verticali (y), rappresentative di dove si presume che il partecipante stia guardando in un dato momento. Anche Opengazer apre un socket UDP locale sulla porta 20230 a cui accede per inviare le stime attuali X e Y .

In questo specifico contesto di studio, ai partecipanti è stata offerta la possibilità di visualizzare in tempo reale le immagini catturate dalla propria webcam prima della fase di calibrazione, un passo cruciale inoltre per ottimizzare il tracciamento. Al fine di mitigare eventuali preoccupazioni legate alla privacy, i ricercatori possono adottare precauzioni come disabilitare la visualizzazione video durante la calibrazione, mantenendo comunque attive funzionalità quali "mostra sovrapposizione volto" e "mostra casella feedback volto". Benché questa modifica possa incidere sulla precisione della calibrazione, potrebbe contribuire a ridurre le eventuali apprensioni dei partecipanti all'inizio dell'esperimento [82].

Capitolo 4

Contributi nei test di usabilità

Nell'ambito del Design dell'Esperienza Utente, che adotta una prospettiva centrata sull'utente (User-Centered), l'introduzione di nuove tecnologie come il tracciamento oculare remoto e in particolare l'impiego dell'eye tracking webcam-based si rivela una metodologia di indagine fondamentale, capace di fornire dati quantitativi relativi all'interazione degli utenti con i prodotti digitali [87]. Queste tecniche consentono di acquisire informazioni preziose, rendendo possibile l'analisi dettagliata del comportamento visivo degli utenti durante l'utilizzo di interfacce digitali. Tra le applicazioni più significative si annoverano gli studi nel campo dell'accessibilità, per guidare i progettisti nell'implementazione di interfacce inclusive, la ricerca nella progettazione della gerarchia delle informazioni, per garantire all'utente di trovare facilmente e in modo intuitivo ciò di cui ha bisogno, nell'analisi dei test A/B per valutare l'efficacia comparativa di diverse versioni di una pagina web, nell'ambito del design responsive, caratterizzato dall'uso di dispositivi diversificati, per aiutare gli sviluppatori a ottimizzare i progetti su vari device quali tablet, smartphone o desktop, garantendo che l'UX sia adattata e coerente. In ultimo, già nel 2010, il valore più significativo dell'eye tracking era considerato il miglioramento della valutazione dei test di usabilità, specialmente nel lavoro con utenti Web non esperti [88]. Poiché permette di registrare lo sguardo e studiare come il compor-

tamento dell'utente differisce da ciò che afferma, per esempio in test tradizionali come questionari soggettivi o metodo Think-Aloud [16], per comprendere a pieno la navigazione dell'utente nei siti Web e nelle app mobili e come interagisce con l'interfaccia in modo oggettivo.

4.1 Casi di studio nella letteratura

Recentemente, il campo di indagine relativo al tracciamento oculare si è evoluto orientandosi verso l'obiettivo di sviluppare e ri-progettare interfacce digitali efficaci, osservando l'adozione di test formativi condotti durante l'implementazione per informare la progettazione stessa, e di test sommativi, eseguiti al termine dello sviluppo sulla versione finale del prodotto [89]. Tale direzione mira a potenziare l'esperienza utente, aprendo la strada a soluzioni progettuali di elevata qualità, che garantiscano un'interazione fluida, aumentino la competitività del prodotto e migliorino il livello di soddisfazione dell'utente dal punto di vista estetico e di desiderio di riutilizzo.

Il presente capitolo intende esplorare studi che hanno integrato i metodi di valutazione qualitativa dell'usabilità con l'approccio oggettivamente misurabile dell'eye tracking, con l'intento di ricavare modelli che forniscano indicazioni empiricamente fondate per la progettazione di applicazioni che rispettino i principi fondamentali di usabilità. Attualmente, la letteratura accademica risulta essere limitata nella trattazione di casi che studiano l'impatto dell'eye tracking webcam-based sulla web usability.

Tuttavia, uno studio condotto dall'Istituto Superiore di Turismo, Gestione Alberghiera e Restauro dei Monumenti Abukir [90], mira ad esaminare le modalità di interazione degli utenti con il sito web ufficiale del Ministero del Turismo e delle Antichità egiziano, riconosciuto come fonte principale di informazioni turistiche in Egitto. L'analisi si concentra sull'osservazione dei pattern di navigazione dei visitatori durante sessioni di esplorazione libera del sito, allo scopo di comprendere meglio come le persone accedono e utilizzano

le risorse disponibili.

L'obiettivo primario è quello di approfondire la comprensione dell'attenzione visiva e della percezione degli elementi di gestione del sito web, nonché di valutare la struttura del design dell'informazione e la qualità del design visivo. Tale analisi è condotta attraverso l'applicazione del paradigma costruzionista sociale, il quale sostiene che le esperienze degli individui e le loro decisioni durante la navigazione online sono modulate dalle influenze sociali e dalle dinamiche dell'ambiente digitale in cui operano [90].

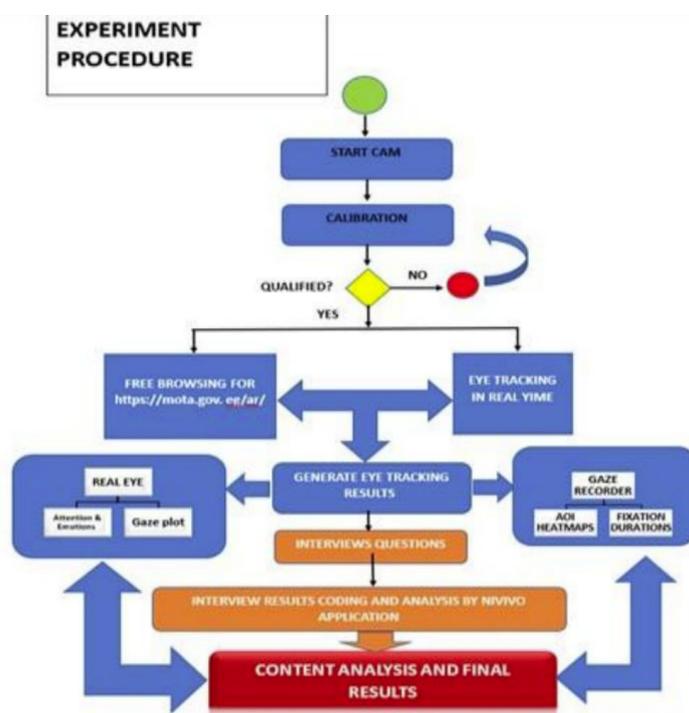


Figura 4.1: Struttura pratica dell'esperimento [90].

L'esperienza user-friendly, la facilità di navigazione e la capacità di soddisfare le esigenze di informazione sono fattori determinanti che impattano nella selezione di una particolare destinazione di viaggio. Inoltre è ampiamente riconosciuto che gli utenti tendono a concentrare la loro attenzione sulle immagini prima di esaminare il testo, il quale deve essere necessariamente conciso. Pertanto, è fondamentale stabilire una struttura

visiva chiara che indirizza efficacemente gli utenti nella loro esplorazione della pagina web. Lo studio coinvolge un campione di 36 partecipanti liberamente iscritti e adotta un approccio multi-metodo, che combina l'utilizzo della tecnologia di monitoraggio oculare tramite webcam portatili, mediante le applicazioni GazeRecorder e Realeye, con interviste personali. Questa metodologia consente di integrare i risultati ottenuti dai due approcci e di identificare i punti di forza e di debolezza del sito web analizzato. L'esperimento è stato condotto all'interno di un laboratorio controllato al fine di assicurare la stabilità delle condizioni sperimentali. Queste condizioni includono una distanza costante dal display, approssimativamente pari a 65-70 cm e l'utilizzo di un laptop Lenovo con uno schermo da 17 pollici. Il compito assegnato consisteva nell'effettuare test funzionali e nell'esplorare in maniera generica il sito web oggetto di studio.

Dall'analisi dei risultati emersi, si evince che l'interesse iniziale degli utenti si concentra principalmente sull' "Area of Interest" (AOI) relativa alla sezione delle notizie, verosimilmente in virtù della correlazione con elementi visivi quali immagini e video. Successivamente, una seconda fase di focalizzazione si manifesta sull'header del sito, con un tempo medio di permanenza stimato in circa 10.000 millisecondi. Le espressioni facciali neutre e la mancanza di manifestazioni di sorpresa suggeriscono un'apprezzamento nei confronti del design proposto, ma al contempo denotano una relativa assenza di coinvolgimento emotivo da parte degli utenti. Risulta rilevante notare che l'area destinata alla mappa del sito ha registrato una durata media di fissazione simile, indicando un investimento significativo da parte degli utenti nella comprensione delle complessità strutturali del sito stesso. Tale fenomeno potrebbe essere interpretato come un impegno volto a familiarizzare con l'organizzazione e la disposizione delle informazioni all'interno del sito. Infatti, alcuni partecipanti hanno confermato di aver incontrato difficoltà nel comprendere il contenuto che sarebbe stato rivelato facendo clic sui pulsanti dei "Servizi digitali" e sui link dei siti web associati. Pertanto, tale tendenza mette in luce le sfide incontrate dagli utenti nel processo di assimilazione rapida dei dettagli del sito e nell'ac-

cesso agevole alle informazioni desiderate. In linea generale, le mappe di calore ottenute non raggiungono la scala di grigi, il che suggerisce che l'intero sito è stato esplorato. Tuttavia, emerge una valutazione critica riguardo all'usabilità della barra degli strumenti di ricerca tra i partecipanti, accompagnata dall'osservazione che 26 intervistati non hanno identificato la disponibilità di file specializzati scaricabili. Questo riscontro suggerisce la necessità di rivedere il design e il posizionamento di questi elementi nella pagina al fine di migliorarne la visibilità e l'efficacia complessiva per gli utenti visitatori del sito web.

Un'ulteriore indagine condotta tramite l'utilizzo del software GazeRecorder e successivamente divulgata sulla piattaforma di pubblicazione Medium, si propone di analizzare il comportamento visivo degli utenti di Google durante la navigazione delle pagine dei risultati, includendo l'esplorazione delle diverse funzionalità messe a disposizione dal motore di ricerca [91]. Dopo aver selezionato 5 utenti (requisito minimo per uno studio sull'usabilità con tracciamento oculare, sulla base della teoria di Nielsen [25]), veniva chiesto di completare un compito di ricerca, ovvero individuare il negozio di scarpe più vicino, per 3 utenti da condurre sul browser Google Chrome e per 2 utenti su Bing. Eseguita la calibrazione e stabilita l'elevata sensibilità ai movimenti della testa, ancora una volta tutti i partecipanti hanno eseguito il test in un laboratorio che garantisse le medesime variabili ambientali, una luce naturale laterale, una sedia standard, un laptop 15" e luce indiretta artificiale. L'analisi di come gli utenti visualizzano i nuovi layout dei risultati dei motori di ricerca rivela un cambiamento nel comportamento visivo degli utenti rispetto ai modelli precedentemente documentati. Si osserva una mancanza del tradizionale pattern "F", originariamente descritto da Jacob Nielsen [92], che delineava il modello di scansione degli occhi degli utenti durante la navigazione web. Tale modello indicava che gli utenti tendono a iniziare la lettura dall'angolo superiore sinistro della pagina, quindi a muoversi orizzontalmente verso destra e successivamente a scendere verticalmente lungo il margine sinistro, leggendo solo parzialmente i contenuti lungo il percorso. Inoltre, emerge anche una deviazione dal modello del "Triangolo d'Oro", il



Figura 4.2: Heatmaps del compito assegnato nello studio [88].

quale suggerisce che gli utenti si concentrano principalmente su tre punti chiave all'interno di una pagina web: l'angolo superiore sinistro (corrispondente all'inizio del testo), l'angolo superiore destro (solitamente sede di annunci pubblicitari o call-to-action), e la parte inferiore centrale della pagina (spesso contenente footer o informazioni aggiuntive). Questi punti, che formano una sorta di "triangolo", solitamente attirano la maggior parte dell'attenzione degli utenti durante la navigazione.

Questo suggerisce che con l'introduzione dei risultati arricchiti e della distribuzione degli annunci, gli utenti di Google manifestano una tendenza a esplorare l'intera pagina dei risultati di ricerca al fine di soddisfare le proprie esigenze informative. Questo fenomeno è corroborato dal fatto che una considerevole quota di utenti, al momento della ricerca, presta significativa attenzione ai contenuti arricchiti quali grafici della conoscenza, caroselli, snippet in evidenza, Google Local e Google Shopping, prima di rivolgere l'attenzione ai risultati tradizionali. Inoltre l'utente familiarizzato con la presenza di annunci pubblicitari, tende a evitare i primi risultati prodotti dalle aziende, navigando rapidamente l'elenco verso i risultati organici indipendenti. Questo comportamento è supportato da evidenze empiriche che confermano che solo il 23% degli utenti fissa gli annunci posizionati a destra dei risultati, probabilmente a causa dello scarso posizionamento e dell'influenza dei dispositivi mobili che supportano l'utilizzo verticale delle interfacce.

Nel contesto della pandemia di COVID-19, è cresciuta significativamente la necessità, identificata da scienziati cognitivi, sviluppatori e ingegneri del fattore umano, di disporre di strumenti capaci di analizzare a distanza il comportamento degli utenti per determinare l'adempimento dei requisiti di usabilità. Questa esigenza ha stimolato ricerche condotte a distanza su ampi campioni di utenti, operanti nell'ambito domestico con i propri dispositivi. Di conseguenza, si procede la discussione con l'esplorazione di un recente studio di Remote Usability Testing (RUT), che propone il framework denominato Miora, il quale avvalendosi del riconoscimento delle espressioni facciali e delle metriche dello sguardo, nonché di sofisticati algoritmi di analisi, raccoglie dati sia qualitativi che quantitativi destinati a un'approfondita valutazione dell'usabilità [89]. La piattaforma proposta si basa su un'architettura client-server, che coinvolge quattro attori principali: il Test Manager lato client, la Dashboard, il modulo Deep Learning e il modulo di analisi dell'usabilità. Un database relazionale MySQL viene utilizzato per archiviare le previsioni del modello e i risultati dell'interazione dell'utente, come timestamp degli eventi, nomi delle attività e tempo trascorso per completarle. L'affidabilità del sistema è stata sperimentata in due scenari d'uso distinti: un test di usabilità condotto su un negozio online di elettronica e un test di usabilità eseguito su una piattaforma web gestionale.

Nel primo esperimento, finalizzato alla valutazione dell'usabilità del medesimo sito su dispositivi differenti, sono stati coinvolti 38 utenti con competenze informatiche di base, suddivisi casualmente in due gruppi: il gruppo A, che ha operato tramite desktop, e il gruppo B, che ha utilizzato smartphone. Emerge una maggiore frustrazione tra i partecipanti del gruppo B, soprattutto durante le fasi di confronto dei prodotti elettronici e di compilazione dei moduli necessari per completare il processo di acquisto. Tale osservazione trova conferma anche nell'analisi dei percorsi dello sguardo, i quali rivelano un'osservazione più lineare e spazialmente più circoscritta nell'utente che ha completato il compito tramite interfaccia desktop. Questa discrepanza può essere attribuita alle dimensioni dello schermo: l'interfaccia desktop consente all'utente di visualizzare

contemporaneamente le caratteristiche di diversi modelli di elettrodomestici sulla stessa riga, agevolando così il confronto, mentre l'orientamento tipicamente verticale dei dispositivi mobili limita questa possibilità, permettendo di visualizzare solo due modelli sulla stessa riga e richiedendo quindi all'utente di scorrere continuamente per confrontare le caratteristiche di diversi prodotti. La conduzione di ricerche sui negozi online sono cruciali nell'identificare i problemi che possono influenzare negativamente la conversione e le vendite. È fondamentale che i negozi online siano in grado di presentare efficacemente le proprie offerte e trasmettere in modo chiaro le informazioni sui prodotti [93].

Il secondo caso d'uso ha coinvolto 12 utenti ai quali è stato richiesto di accedere al sistema ed eseguire una serie di compiti, tra cui l'aggiunta di widget relativi alle previsioni meteo, l'assegnazione di compiti a un membro del team, la modifica del layout di una griglia e l'invio di messaggi a un altro membro del team. La valutazione dell'usabilità basata sui dati raccolti ha rivelato la difficoltà per alcuni utenti di trovare il menu "App", e per altri confusione e ripensamenti nella navigazione verso la sezione "Agenda", alcuni utenti hanno intrapreso percorsi più lunghi per raggiungere l'interfaccia target. Questo dimostra che lo strumento Miora può essere di grande assistenza per i moderatori nella raccolta e nell'analisi dei dati [89]. L'integrazione della ricerca sull'usabilità nel processo di progettazione orientato al cliente è essenziale poiché si concentra sulla comprensione dei bisogni e delle motivazioni degli utenti, spesso non esplicitamente dichiarati. Questo approccio favorisce la realizzazione di progetti finali che soddisfano le effettive aspettative dei consumatori [93].

4.2 Eye Tracking Webcam-Based: Pro e Contro nei Test di Usabilità

Lo studio [89] afferma che nessun metodo di valutazione da solo può essere sufficiente per una valutazione completa dell'usabilità. In questo senso l'eye tracking webcam -

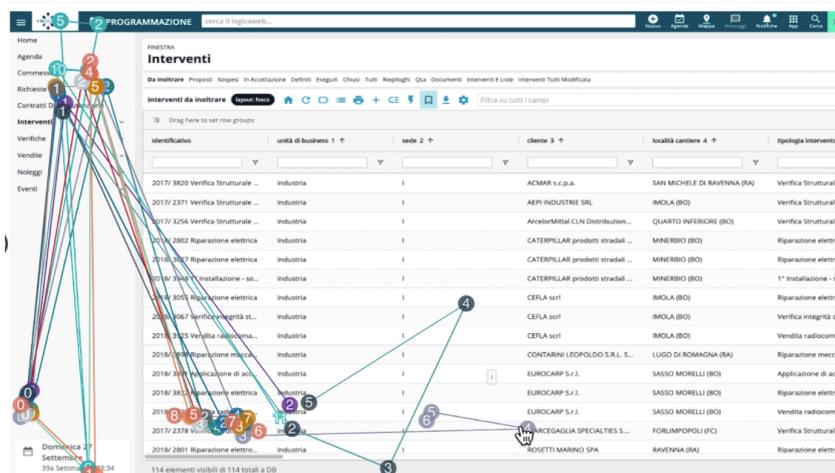


Figura 4.3: Click paths degli utenti durante l'esecuzione dell'attività di assegnazione di lavoro sull'interfaccia dell'app Agenda [89].

based è emerso come metodo promettente. Tuttavia, come ogni tecnologia emergente, presenta vantaggi e limitazioni che devono essere attentamente considerati prima della sua adozione e nell'interpretazione dei risultati ottenuti. In questo paragrafo, si fornisce una panoramica dei suoi aspetti positivi e negativi.

Una delle principali aree di interesse di questa innovazione è la sua capacità di agevolare la raccolta di campioni ampi e diversificati di utenti tester, permettendo così la conduzione di ricerche eterogenee che siano rappresentative di diverse etnie e culture [94]. Vantaggiosa diventa la generalizzabilità degli studi, rendendoli facilmente replicabili e riducendo al minimo il rischio di soggettività. Tale facilitazione favorisce la promozione della collaborazione internazionale tra team di ricerca. L'utilizzo dell'eye-tracking online si configura come uno strumento prezioso per tutti i ricercatori che operano nel contesto digitale, poiché consente di garantire l'umanità dei soggetti di studio e di distinguere con precisione tra utenti reali e algoritmi informatici, noti come "bot".

Tra i benefici dell'adozione dei test di usabilità remoti, supportati da eye-tracking basato su webcam, spicca la prospettiva di ampliare i dataset mediante l'impiego del crowdsour-

cing, una pratica che coinvolge un vasto insieme di individui tramite la rete internet al fine di ottenere servizi. Attraverso l'analisi di set di dati più ricchi e diversificati, è possibile ottimizzare ulteriormente gli algoritmi di eye tracking, incrementando la loro capacità di generalizzazione e adattabilità. Ciò rende tali algoritmi di apprendimento, più efficaci nell'interpretare svariate tipologie di pattern visivi, consentendo di sviluppare modelli estremamente robusti e adattivi in grado di compensare le variazioni delle condizioni di illuminazione, le diverse disponibilità di hardware e le peculiari caratteristiche individuali [72].

L'impiego delle webcam comportano in una certa misura l'automazione dei test di usabilità, permettendo lo svolgimento di studi sull'esperienza utente in modalità remota e non moderata. Questo approccio richiede solamente l'uso di un computer con telecamera integrata e una connessione internet affidabile, eliminando la necessità di allestire un laboratorio di ricerca dedicato.

Questa semplificazione rende tale tecnologia accessibile a una vasta gamma di professionisti, inclusi ricercatori, educatori e sviluppatori, che altrimenti potrebbero trovarsi esclusi da questa risorsa tecnologica. Tale modello risulta particolarmente vantaggioso sia per entità di dimensioni ridotte che per organizzazioni di dimensioni più ampie, sia commerciali che accademiche, che desiderano una soluzione scalabile, economica e veloce [85].

Considerando le esigenze di rapidità nell'elaborazione dei dati, uno studio [95] ha identificato che, per facilitare l'adozione di questa tecnica di tracciamento oculare in ambiti applicativi estesi e generali, il carico computazionale associato ai metodi che si avvalgono del riconoscimento di caratteristiche geometriche risulta essere meno oneroso rispetto a quelli che si basano sull'utilizzo di algoritmi di machine learning. In questo senso, lo studio propone un metodo per localizzare la pupilla controllando il cambiamento dell'intensità del colore sull'immagine degli occhi. L'indipendenza dall'hardware specializzato ad alto costo ha però introdotto una serie di sfide tecniche legate alla precisione e al-

l'accuratezza. Tale approccio, sebbene economicamente più accessibile, si scontra con la minore qualità dell'immagine, attribuibile sia a condizioni sperimentali meno controllate rispetto agli ambienti di laboratorio, sia all'impiego di hardware meno costoso. Inoltre, la frequenza di campionamento, limitata a circa un campione ogni 30 millisecondi, contribuisce a incrementare il rumore nei dati raccolti. Fattori quali il posizionamento delle fonti luminose nello spettro visibile e movimenti ampi della testa degli utenti possono ulteriormente rappresentare delle limitazioni. Nell'essenzialità dei requisiti richiesti, la qualità della connessione Internet dell'utente costituisce un aggiuntivo fattore critico, negli studi remoti. Un'alta latenza in upload può significativamente compromettere l'acquisizione di metriche facciali e oculari, compromettendo la loro affidabilità o rendendole irrecuperabili. Tale limitazione incide direttamente sull'integrità dei dati, evidenziando l'importanza di una valutazione preliminare della connettività per garantire l'efficacia dello studio [89].

Per garantire la migliore qualità dei dati è essenziale sottolineare l'importanza di aderire scrupolosamente alle linee guida e alle pratiche di calibrazione indicate dall'organizzatore dello studio. È incoraggiante notare che gli algoritmi di tracciamento oculare basato su webcam stanno riducendo la loro vulnerabilità a vari fattori di distorsione, quali distrazioni, movimenti inattesi, interazioni verbali, condizioni di illuminazione non ottimali, e l'impiego di dispositivi correttivi visivi come gli occhiali [83]. Nonostante queste sfide, è rassicurante osservare che, in condizioni ideali, il tracciamento oculare effettuato mediante webcam può dimostrare una notevole coerenza e qualità dei dati, affermandosi come uno strumento prezioso per la raccolta di informazioni.

In accordo con questa prospettiva, l'analisi comparativa [75] che mette a confronto le soluzioni remote tradizionali, webcam-based e integrate, su due compiti, uno di rilevamento di punti e uno di ricerca visiva emotiva, evidenzia che i diversi approcci di eye tracking presentano utilità in differenti ambiti di ricerca. Gli eye tracker di alta gamma risultano più idonei per ricerche caratterizzate da esigenze di elevata specificità e preci-

sione nei movimenti oculari più piccoli. Gli eye tracker basati su webcam, al contrario, si dimostrano più vantaggiosi in ambiti di ricerca che richiedono la raccolta di dati su vasta scala. Affermando che l'eye tracking basato su webcam costituisce un'alternativa pratica e conveniente rispetto all'eye tracking tradizionale. Nonostante presenti una minore precisione e accuratezza, il tracciamento oculare tramite webcam si rivela un metodo altamente affidabile, simile al tracciamento oculare remoto con hardware specializzato [75].

Conclusioni

Il presente lavoro di ricerca ha inizialmente contribuito ad esplorare gli aspetti chiave dell'usabilità delle interfacce digitali, chiarendo le linee guida che definiscono gli standard qualitativi per gli sviluppatori. E ha posto particolare attenzione alle limitazioni legate alle metodologie di analisi relative ai contesti tradizionali, quali i laboratori di ricerca specializzati o le strutture appartenenti alle grandi aziende del mercato, evidenziando il basso livello di automazione nel processo di valutazione, la difficoltà nel reclutamento degli utenti e l'elevato dispendio di risorse in termini di tempo e costi.

Questa analisi preliminare ha evidenziato come l'adozione di metodologie innovative e di recente sviluppo, come l'uso di software per il tracciamento oculare basato su webcam, abbia progressivamente consentito l'emergere di approcci valutativi remoti, semi-automatizzati e asincroni, che si affiancano ai convenzionali test dell'usabilità, senza la necessità di un moderatore esperto in tempo reale. Questa tendenza si manifesta con la crescente disponibilità di strumenti online che permettono l'acquisizione di dati sul comportamento visivo durante la navigazione web.

Lo studio approfondisce come l'apertura verso metodologie più flessibili possa offrire vantaggi sulla raccolta di dati legati a metriche più oggettive. Ciò permette di considerare una gamma più ampia di contesti e di ottenere insight più vicini alle reali esperienze degli utenti finali. Poiché, in questo contesto, gli utenti non sono soggetti a condizionamenti derivanti dall'ambiente di ricerca, bensì sono impegnati in attività di navigazione in contesti familiari e con i propri dispositivi personali.

In questo quadro ideale e promettente, è emerso che l'implementazione di soluzioni gratuite, librerie open source e software sperimentali per l'analisi del tracciamento oculare, spesso richiede competenze base nello sviluppo del codice, perché è necessario integrare brevi sequenze di codice nei siti web sottoposti a test. Inoltre, si è rivelata cruciale l'attenzione verso il corretto posizionamento delle fonti di luce naturale, per garantire l'efficacia degli algoritmi di riconoscimento facciale e, in una fase successiva, per quelli dedicati al riconoscimento della pupilla. Questi aspetti si riflettono su competenze specializzate, motivo per cui nella letteratura accademica consultata, si osserva ancora una carenza di indagini che impiegano queste nuove metodologie, nell'ambito specifico degli studi sull'usabilità asincroni e non moderati. È importante, quindi, sottolineare che le soluzioni accademiche a basso costo non raggiungono la stessa diffusione di piattaforme online che standardizzano le ricerche di tracciamento oculare, ma la cui disponibilità è spesso associata a sottoscrizioni di abbonamenti e costi elevati.

Prima della redazione di questo elaborato, si supponeva che i ritardi di comunicazione e la latenza di banda, potessero costituire limitazioni significative anche in questa metodologia, fondata prevalentemente sulle tecnologie web. Tuttavia, l'analisi della letteratura disponibile non ha confermato tali preoccupazioni, lo si deve presumibilmente ai miglioramenti tecnologici e all'ottimizzazione delle piattaforme online, che hanno contribuito a mitigare questi problemi, rendendo il tracciamento oculare remoto sempre più affidabile e accessibile per l'analisi dell'esperienza utente.

Una prospettiva fondamentale di questa ricerca riguarda lo studio di fattibilità, si valuta la possibilità di attuare queste analisi, in modo rigoroso anche al di fuori degli ambienti convenzionalmente dedicati alla ricerca. Di conseguenza, si pone in evidenza la necessità di riconsiderare l'affidabilità e la validità del monitoraggio oculare indipendente dall'utilizzo di telecamere professionali e specializzate. In tale contesto, il presente elaborato si prefigge di introdurre i lettori alle metodologie convenzionali di eye tracking,

per successivamente concentrarsi sull'analisi delle peculiarità e delle potenzialità dell'eye tracking realizzato in condizioni di illuminazione passiva, non ad infrarossi.

Dagli approfondimenti su “Affidabilità e Validità”, emerge che con una corretta configurazione dell'ambiente di test ed una accurata esecuzione delle fasi iniziali, incluse la calibrazione e il posizionamento stabile e ottimale delle fonti di illuminazione, è possibile acquisire e interpretare le fissazioni oculari degli utenti con un margine di errore minimo, con precisione ed accuratezza paragonabili a quelle con eye tracker di alta qualità, generalmente per esperimenti che coinvolgono un massimo di 6 Aree di Interesse, quindi macro aree dello schermo. In particolare, nel contesto degli e-commerce, scelti per la loro densità informativa, si riscontra una sfida nell'identificazione precisa del focus dell'utente, specie riguardo alla distinzione tra la visualizzazione di una scheda prodotto rispetto ad altre aree di interesse. La prossimità tra le zone designate per la ricerca può complicare l'accurata identificazione delle metriche dello sguardo. Si propende, pertanto, per l'adozione in interfacce caratterizzate da aree di interesse designate di ampie dimensioni in contesti di valutazione e che prediligono la ricerca di massa. In sperimentazioni quindi, che necessitano della partecipazione di un elevato numero di utenti che interagiscono con le interfacce mediante i propri dispositivi, all'interno dei loro ambienti quotidiani. Questa modalità di raccolta dati si rivela essenziale per garantire che le informazioni raccolte riflettano comportamenti autentici e per contribuire all'arricchimento dei set di dati destinati all'apprendimento automatico degli algoritmi. In questo modo, si minimizza il rischio di overfitting, garantendo allo stesso tempo che gli algoritmi siano il più generalizzabili possibile.

In conclusione, l'indagine enfatizza la necessità di ulteriori ricerche per ampliare i casi di studio esemplificativi e per convalidare gli algoritmi di tracciamento oculare, particolarmente in ambienti di interfacce digitali complesse, quali gli e-commerce. Questo processo è cruciale per affinare l'analisi delle fissazioni oculari, in ambienti in cui gli utenti

spesso sperimentano frustrazione e difficoltà nel reperire le informazioni o i prodotti di loro interesse a causa di sistemi di navigazione e ricerca non ottimizzati.

Bibliografia e Sitografia

- [1] PhD Jeff Sauro. *A Brief History of Usability; MeasuringU* — *measuringu.com*. <https://measuringu.com/usability-history/>. [Accessed 12-02-2024]. 2013.
- [2] Rodney Fuller. “Book Review: Usability Engineering by Jakob Nielsen”. In: *ACM SIGCHI Bulletin* 27.4 (1995), pp. 77–78.
- [3] Gerda Gemser, Dany Jacobs e Ritzo Ten Cate. “Design and competitive advantage in technology-driven sectors: The role of usability and aesthetics in Dutch IT companies”. In: *Technology Analysis & Strategic Management* 18.5 (2006), pp. 561–580.
- [4] Dorina Rajanen et al. “UX professionals’ definitions of usability and UX—A comparison between Turkey, Finland, Denmark, France and Malaysia”. In: *Human-Computer Interaction—INTERACT 2017: 16th IFIP TC 13 International Conference, Mumbai, India, September 25-29, 2017, Proceedings, Part IV* 16. Springer. 2017, pp. 218–239.
- [5] Nigel Bevan, James Carter e Susan Harker. “ISO 9241-11 revised: What have we learnt about usability since 1998?” In: *Human-Computer Interaction: Design and Evaluation: 17th International Conference, HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings, Part I* 17. Springer. 2015, pp. 143–151.
- [6] Jakob Nielsen. *Usability engineering*. Morgan Kaufmann, 1994.

-
- [7] Donald Norman. “User centered system design”. In: *New perspectives on human-computer interaction* (1986).
- [8] Donald A Norman. *The psychology of everyday things*. Basic books, 1988.
- [9] Beth Adelson. “The emotional design of everyday things: The 2006 Benjamin Franklin Medal in computer and cognitive science presented to Donald A. Norman”. In: *Journal of the Franklin Institute* 347.4 (2010), pp. 681–687.
- [10] Jakob Nielsen e Rolf Molich. “Heuristic evaluation of user interfaces”. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 1990, pp. 249–256.
- [11] Jakob Nielsen. “A 100-year view of user experience”. In: *Nielsen Norman Group* 24 (2017).
- [12] M Niranjnamurthy et al. “Research study on importance of usability testing/User Experience (UX) testing”. In: *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 3.10 (2014), pp. 78–85.
- [13] Jean Scholtz. “Usability evaluation”. In: *National Institute of Standards and Technology* 1 (2004).
- [14] PhD Jim Lewis. *The Methods UX Professionals Use (2022)*, *MeasuringU — measuringu.com*. <https://measuringu.com/ux-methods-2022/>. [Accessed 2023]. 2022.
- [15] Sri Kurniawan. “Interaction design: Beyond human-computer interaction by Preece, Sharp and Rogers (2001), ISBN 0471492787”. In: *Universal Access in the Information Society* 3 (2004), pp. 289–289.
- [16] David W Eccles e Güler Arsal. “The think aloud method: what is it and how do I use it?” In: *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health* 9.4 (2017), pp. 514–531.

-
- [17] Giuseppe Desolda et al. “Asynchronous Remote Usability Tests Using Web-Based Tools Versus Laboratory Usability Tests: An Experimental Study”. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* (2023).
- [18] H Rex Hartson et al. “Remote evaluation: the network as an extension of the usability laboratory”. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*. 1996, pp. 228–235.
- [19] AHMED S Alghamdi et al. “A comparative study of synchronous and asynchronous remote usability testing methods”. In: *International Review of Basic and Applied Sciences* 1.3 (2013), pp. 61–97.
- [20] Jonna Helene Holm Pedersen et al. “Introducing Asynchronous Remote Usability Testing in Practice: An Action Research Project”. In: *Human-Computer Interaction—INTERACT 2021: 18th IFIP TC 13 International Conference, Bari, Italy, August 30–September 3, 2021, Proceedings, Part IV 18*. Springer. 2021, pp. 320–338.
- [21] Ryan West e Katherine Lehman. “Automated summative usability studies: an empirical evaluation”. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. 2006, pp. 631–639.
- [22] Obead Alhadreti, Pam Mayhew e Majed Alshamari. “A comparison of in-lab and synchronous remote usability testing methods: effectiveness perspective”. In: *IADIS International Conference Interfaces and Human Computer Interaction 2011, Part of the IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2011, MCCSIS 2011*. 2011, pp. 3–9.
- [23] Alfred L Yarbus. *Eye movements and vision*. Springer, 2013.
- [24] Marcel A Just e Patricia A Carpenter. “A theory of reading: from eye fixations to comprehension.” In: *Psychological review* 87.4 (1980), p. 329.
- [25] Jakob Nielsen e Kara Pernice. *Eyetracking web usability*. New Riders, 2010.

- [26] Monika Płużyczka. “The first hundred years: A history of eye tracking as a research method”. In: *Applied Linguistics Papers* 25/4 (2018), pp. 101–116.
- [27] Linden J Ball e Beth H Richardson. “Eye Movement in User Experience and Human–Computer Interaction Research”. In: *Eye Tracking: Background, Methods, and Applications*. Springer, 2022, pp. 165–183.
- [28] *Oculometria - Wikipedia — it.wikipedia.org*. <https://it.wikipedia.org/wiki/Oculometria>. [Accessed 2023].
- [29] Qing-Xing Qu et al. “User experience design based on eye-tracking technology: a case study on smartphone APPs”. In: *Advances in Applied Digital Human Modeling and Simulation: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Digital Human Modeling and Simulation, July 27-31, 2016, Walt Disney World®(R), Florida, USA*. Springer. 2017, pp. 303–315.
- [30] Alan Dix. *Human-computer interaction*. Pearson Education, 2003.
- [31] EyeSee. *Eye Tracking Through History — eyesee*. <https://medium.com/@eyesee/eye-tracking-through-history-b2e5c7029443>. [Accessed 2023].
- [32] Robert JK Jacob e Keith S Karn. “Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises”. In: *The mind’s eye*. Elsevier, 2003, pp. 573–605.
- [33] Daniel C Richardson e Michael J Spivey. “Eye tracking: Characteristics and methods”. In: *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering* 3 (2004), pp. 1028–1042.
- [34] Edmund B. Huey. “Preliminary Experiments in the Physiology and Psychology of Reading”. In: *The American Journal of Psychology* 9.4 (1898), pp. 575–586. ISSN: 00029556. URL: <http://www.jstor.org/stable/1412192> (visitato il 12/02/2024).
- [35] Richard A Monty. “An advanced eye-movement measuring and recording system.” In: *American Psychologist* 30.3 (1975), p. 331.

- [36] Marcel Adam Just e Patricia A Carpenter. “Eye fixations and cognitive processes”. In: *Cognitive psychology* 8.4 (1976), pp. 441–480.
- [37] Michael Schiessl et al. “Eye tracking and its application in usability and media research”. In: *MMI-interaktiv Journal* 6.2003 (2003), pp. 41–50.
- [38] *Eye Tracking Market Size Worth \$8.06 Billion By 2030* — *grandviewresearch.com*. <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-eye-tracking-market>. [Accessed 2023].
- [39] Jennifer K Bertrand e Craig S Chapman. “Dynamics of eye-hand coordination are flexibly preserved in eye-cursor coordination during an online, digital, object interaction task”. In: *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2023, pp. 1–13.
- [40] Benjamin T Carter e Steven G Luke. “Best practices in eye tracking research”. In: *International Journal of Psychophysiology* 155 (2020), pp. 49–62.
- [41] MD Timothy C. Hain. *Eye movement recording devices* — *dizziness-and-balance.com*. <https://dizziness-and-balance.com/practice/eyemove.html>. [Accessed 2023].
- [42] Puja Sorate e Gyankamal Chhajed. “Survey Paper on Eye Gaze Tracking Methods and Techniques”. In: (lug. 2021), pp. 2395–0056.
- [43] Matías García e Sandra Cano. “Eye Tracking to Evaluate the User eXperience (UX): Literature Review”. In: *International Conference on Human-Computer Interaction*. Springer. 2022, pp. 134–145.
- [44] Zohreh Sharafi et al. “A practical guide on conducting eye tracking studies in software engineering”. In: *Empirical Software Engineering* 25 (2020), pp. 3128–3174.
- [45] *Eye tracking - Wikipedia* — *en.wikipedia.org*. http://en.wikipedia.org/wiki/Eye_tracking. [Accessed 2023].

-
- [46] *File:Visible light eye-tracking algorithm.jpg - commons.wikimedia.org*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38803307>. [Accessed 2024].
- [47] Kirsten A Dalrymple et al. “An examination of recording accuracy and precision from eye tracking data from toddlerhood to adulthood”. In: *Frontiers in psychology* 9 (2018), p. 803.
- [48] *Eye Trackers - COGAIN: Communication by Gaze Interaction (hosted by the COGAIN Association) — wiki.cogain.info*. https://wiki.cogain.info/index.php/Eye_Trackers. [Accessed 2024].
- [49] *File:Gaze plot eye tracking on Wikipedia with 3 participants.png - Wikipedia — it.m.wikipedia.org*. https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Gaze_plot_eye_tracking_on_Wikipedia_with_3_participants.png. [Accessed 2024].
- [50] *File:Eyetracking heat map Wikipedia.jpg - commons.wikimedia.org*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=60655049>. [Accessed 2024].
- [51] Maja Kuhar e Tanja Merčun. “Exploring user experience in digital libraries through questionnaire and eye-tracking data”. In: *Library & Information Science Research* 44.3 (2022), pp. 101–175.
- [52] Maike Schindler e Achim J Lilienthal. “Domain-specific interpretation of eye tracking data: towards a refined use of the eye-mind hypothesis for the field of geometry”. In: *Educational Studies in Mathematics* 101 (2019), pp. 123–139.
- [53] Claudia Ehmke e Stephanie Wilson. “Identifying web usability problems from eyetracking data”. In: (2007).
- [54] Martin Groen e Jan Noyes. “Using eye tracking to evaluate usability of user interfaces: Is it warranted?” In: *IFAC Proceedings Volumes* 43.13 (2010), pp. 489–493.

- [55] Fabricio Batista Narcizo, Jose Eustaquio Rangel de Queiroz e Herman Martins Gomes. “Remote eye tracking systems: technologies and applications”. In: *2013 26th Conference on Graphics, Patterns and Images Tutorials*. IEEE. 2013, pp. 15–22.
- [56] Katarzyna Harezlak e Pawel Kasprowski. “Application of eye tracking in medicine: A survey, research issues and challenges”. In: *Computerized Medical Imaging and Graphics* 65 (2018), pp. 176–190.
- [57] Sylwester Bialowas e Adrianna Szyszka. “Eye-tracking in marketing research”. In: *Managing Economic Innovations – Methods and Instruments*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2019, pp. 91–104.
- [58] Doğuş Yüksel. “Investigation of Web-Based Eye-Tracking System Performance under Different Lighting Conditions for Neuromarketing”. In: *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research* 18.4 (2023), pp. 2092–2106.
- [59] Jonathan L Rosch e Jennifer J Vogel-Walcutt. “A review of eye-tracking applications as tools for training”. In: *Cognition, technology & work* 15 (2013), pp. 313–327.
- [60] Michela Balconi, Serena Rezk, Federica Leanza et al. “Environment Impact based on functional and aesthetical features: what is their influence on spatial features and rewarding mechanisms?” In: *COGNITIVE PROCESSING* 16.S1 (2015), pp. 83–83.
- [61] Sezen Lim et al. “Webcam Eye Tracking: Study Conduction and Acceptance of Remote Tests with Gaze Analysis”. In: *arXiv preprint arXiv:2207.14380* (2022).
- [62] Yanina Prystauka, Gerry TM Altmann e Jason Rothman. “Online eye tracking and real-time sentence processing: On opportunities and efficacy for capturing psycholinguistic effects of different magnitudes and diversity”. In: *Behavior Research Methods* (2023), pp. 1–19.

- [63] Jenna Wise. *ETRA ACM SYMPOSIUM ON EYE TRACKING RESEARCH AND APPLICATIONS* — *etra.acm.org*. <https://etra.acm.org/>. [Accessed 2024].
- [64] Anuj Harisinghani et al. “Classification of Alzheimer’s using Deep-learning Methods on Webcam-based Gaze Data”. In: *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction* 7.ETRA (2023), pp. 1–17.
- [65] Omar Namnakani et al. “GazeCast: Using Mobile Devices to Allow Gaze-based Interaction on Public Displays”. In: *Proceedings of the 2023 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. 2023, pp. 1–8.
- [66] Jakub Štěpán Novák et al. “Eye Tracking, Usability, and User Experience: A Systematic Review”. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* (2023), pp. 1–17.
- [67] O.B Jensen. *Webcam-Based Eye Tracking vs. an Eye Tracker [Pros & Cons] - iMotions* — *imotions.com*. <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/webcam-eye-tracking-vs-an-eye-tracker/>. [Accessed 2024]. 2022.
- [68] Alexandra Papoutsaki, James Laskey e Jeff Huang. “Searchgazer: Webcam eye tracking for remote studies of web search”. In: *Proceedings of the 2017 conference on conference human information interaction and retrieval*. 2017, pp. 17–26.
- [69] Atul Sahay e Pradipta Biswas. “Webcam Based Eye Gaze Tracking Using a Landmark Detector”. In: *Proceedings of the 10th Annual ACM India Compute Conference*. 2017, pp. 31–37.
- [70] Fares Alnajjar et al. “Calibration-free gaze estimation using human gaze patterns”. In: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2013, pp. 137–144.
- [71] Michael Xuelin Huang et al. “Building a personalized, auto-calibrating eye tracker from user interactions”. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2016, pp. 5169–5179.

- [72] Pingmei Xu et al. “Turkergaze: Crowdsourcing saliency with webcam based eye tracking”. In: *arXiv preprint arXiv:1504.06755* (2015).
- [73] Niphat Karngumpol e Worapoj Kreesuradej. “Webcam Based Eye Gaze Prediction System with Automatic Calibration for Web Browser”. In: *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. IEEE. 2019, pp. 109–112.
- [74] Alexandra Papoutsaki et al. “WebGazer: Scalable Webcam Eye Tracking Using User Interactions”. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence-IJCAI 2016*. 2016.
- [75] Katarzyna Wisiecka et al. “Comparison of webcam and remote eye tracking”. In: *2022 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. 2022, pp. 1–7.
- [76] William Wang. *Integrating GazeCloudAPI, a high accuracy webcam based eye-tracking solution, into your own web-app — williamwang15*. <https://medium.com/@williamwang15/integrating-gazecloudapi-a-high-accuracy-webcam-based-eye-tracking-solution-into-your-own-web-app-2d8513bb9865>. [Accessed 2024]. 2020.
- [77] Bryn Farnsworth. *10 Free Eye Tracking Software Programs [Pros and Cons] — imotions.com*. <https://imotions.com/blog/insights/trend/free-eye-tracking-software/>. [Accessed 2024]. 2021.
- [78] Piotr Zieliński. *Opengazer: open-source gaze tracker for ordinary webcams — inference.org.uk*. <https://www.inference.org.uk/opengazer/>. [Accessed 2024]. 2012.
- [79] Ibrahim Shehi Shehu et al. “Remote eye gaze tracking research: a comparative evaluation on past and recent progress”. In: *Electronics* 10.24 (2021), p. 3165.

- [80] Amogh Gudi, Xin Li e Jan van Gemert. “Efficiency in real-time webcam gaze tracking”. In: *Computer Vision–ECCV 2020 Workshops: Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part I 16*. Springer. 2020, pp. 529–543.
- [81] Shreshth Saxena, Lauren K Fink e Elke B Lange. “Deep learning models for webcam eye tracking in online experiments”. In: *Behavior Research Methods (2023)*, pp. 1–17.
- [82] Xiaozhi Yang e Ian Krajbich. “Webcam-based online eye-tracking for behavioral research”. In: *Judgment and Decision making* 16.6 (2021), pp. 1485–1505.
- [83] D. Seernani M. Pedersen. *Webcam Eye Tracking Validation Study - iMotions — imotions.com*. <https://imotions.com/blog/learning/product-news/webcam-eye-tracking-validation-study/>. [Accessed 2024]. 2023.
- [84] XLabs Pty Ltd. *Eye / Gaze tracking system Technology Whitepaper*. https://261f2cc8-8def-45d6-bf9a-00b0755e3fa3.filesusr.com/ugd/378c8a_76e0f65bddfc49d39f270fe687aaf155.pdf. [Accessed 2024]. 2014.
- [85] Ine Van der Cruyssen et al. “The validation of online webcam-based eye-tracking: The replication of the cascade effect, the novelty preference, and the visual world paradigm”. In: *Behavior Research Methods (2023)*, pp. 1–14.
- [86] Sune Alstrup Johansen et al. “Low cost vs. high-end eye tracking for usability testing”. In: *CHI’11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 2011, pp. 1177–1182.
- [87] M. Pedersen. *Eye Trackers in Research and Analysis - iMotions — imotions.com*. <https://imotions.com/blog/insights/eye-trackers-in-research-and-analysis/eye-trackers-in-user-experience-ux-design>. [Accessed 12-02-2024]. 2023.

- [88] Marco C Pretorius, Judy van Biljon e Estelle de Kock. “Added value of eye tracking in usability studies: expert and non-expert participants”. In: *Human-Computer Interaction: Second IFIP TC 13 Symposium, HCIS 2010, Held as Part of WCC 2010, Brisbane, Australia, September 20-23, 2010. Proceedings*. Springer. 2010, pp. 110–121.
- [89] Andrea Generosi et al. “A Test Management System to Support Remote Usability Assessment of Web Applications”. In: *Information* 13.10 (2022), p. 505.
- [90] Heba Abdel Kerim Youssef Zidan e Ahmed Ahmed Hashem. “Employing Eye Tracking Analysis to explore User Interest in official Tourism Websites: A Website Management Approach”. In: *Journal of the Faculty of Tourism and Hotels-University of Sadat City* 7.2/2 (2023).
- [91] Laurent Moulouquet. *Eye tracking on modern search engine with GazeRecorder — laurent.moulouquet*. <https://medium.com/@laurent.moulouquet/eye-tracking-on-modern-search-engine-with-gazerecorder-280fc094cf78>. [Accessed 2024].
- [92] Jakob Nielsen. *F-Shaped Pattern For Reading Web Content (original eyetracking research) — nngroup.com*. <https://www.nngroup.com/articles/f-shaped-pattern-reading-web-content-discovered/>. [Accessed 12-02-2024]. 2006.
- [93] Adrianna Mateja. “Usability research of an online store using eye tracking: a comparison of product specification formats”. In: *Procedia Computer Science* 225 (2023), pp. 3233–3242.
- [94] Adrian Steffan et al. “Validation of an open source, remote web-based eye-tracking method (WebGazer) for research in early childhood”. In: *Infancy* 29.1 (2024), pp. 31–55.

-
- [95] Chenyang Zheng e Tsuyoshi Usagawa. “A rapid webcam-based eye tracking method for human computer interaction”. In: *2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*. IEEE. 2018, pp. 133–136.