



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE

“METODI PER LA VALUTAZIONE DEL CARICO MENTALE DEGLI OPERATORI PER
UNA PROGETTAZIONE INTEGRATA DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI”

Relatore: Dott.sa Martina Calzavara

Laureando: Paolo Cuccarolo

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

INDICE

SOMMARIO

I.	INTRODUZIONE	6
II.	PANORAMICA	7
	2.1 MENTAL/COGNITIVE WORKLOAD (CW)	7
	2.2 L'IMPORTANZA CW IN FASE DI PROGETTAZIONE DEI SISTEMI	8
	2.3 L'IMPATTO DELL'INDUSTRIA 4.0	8
III.	MENTAL/COGNITIVE WORKLOAD MEASUREMENTS	10
	3.1 VARIABILI	10
	3.2 INDICE TLX DELLA NASA	11
	3.2.1 PROCEDURA NASA-TLX	13
	3.3 WORKLOAD PROFILE	13
IV.	EYE TRACKING-METODO COLET	14
	4.1 MISURAZIONI OCULARI DEL CARICO DI LAVORO COGNITIVO	14
	4.2 METODO COLET	16
	4.2.1 PARTECIPANTI, MATERIALI E SETUP	17
	4.2.2 PROCEDURA DELL'ESPERIMENTO	19
	4.2.3 VALUTAZIONE DEL CARICO DI LAVORO COGNITIVO	20
	4.2.3.1 MISURE SOGGETTIVE	20
	4.2.3.2 MISURE DI PERFORMANCE	20
	4.2.3.3 MISURE FISIOLOGICHE	20
	4.2.4 PRIMA ANALISI DEI DATI	21
	4.2.4.1 RILEVAMENTO SACCAD E FISSAZIONE	21
	4.2.4.2 RILEVAMENTO BATTITI DI CIGLIA E MISURE PUPILLARI	21
	4.2.4.3 TRAINING DEL MODELLO	22

4.2.5	RISULTATI DELLO STUDIO	22
4.2.5.1	ANALISI DEL MACHINE LEARNING	23
4.2.6	COMMENTO/INTERPRETAZIONE DEI DATI	25
V.	METODO PER LA STIMA DEL COGNITIVE WORKLOAD IN TEMPO REALE ...	28
5.1	METODOLOGIA	28
5.2	IL QUADRO DI VALUTAZIONE DEL CARICO COGNITIVO	29
5.2.1	MODULO HUMAN UPPER-BODY KINEMATICS TRACKING. .	30
5.2.2	MODULO HUMAN ATTENTION TRACKING	31
5.2.3	MODULO INSTRUCTION	32
5.2.4	MODULO PER LA STIMA DEL CARICO COGNITIVO	32
5.3	DEFINIZIONE DEI FATTORI DI CARICO COGNITIVO	32
5.3.1	SFORZO MENTALE	33
5.3.1.1	PERDITA DI CONCENTRAZIONE	33
5.3.1.2	RITARDO DI APPRENDIMENTO	33
5.3.1.3	RICHIESTA DI CONCENTRAZIONE	33
5.3.1.4	COSTO I ISTRUZIONE	34
5.3.1.5	DIFFICOLTA' DEL COMPITO	34
5.3.1.6	FRUSTRAZIONE CAUSATA DAL FALLIMENTO	35
5.3.1.7	IDENTIFICAZIONE DELLO STRUMENTO	35
5.3.2	LIVELLO DI STRESS	35
5.3.3	POSTAZIONE DI LAVORO	36
5.3.4	STIMA DEI PUNTEGGI DI CARICO COGNITIVO	36
5.4	ANALISI SPERIMENTALE	36
5.4.1	SET-UP	36
5.4.2	RISPOSTA HRV/RISPOSTE CUTANEE GALVANICHE	37
5.4.3	COMPITO SECONDARIO	38

5.4.4 QUESTIONARIO SOGGETTIVO	38
5.4.5 PROTOCOLLO DELL'ESPERIMENTO	39
5.5 VALUTAZIONE DEL CARICO COGNITIVO	39
5.6 FEEDBACK VISIVO ONLINE	40
5.7 COMMENTO E CONCLUSIONI	40
VI. METODO CLAM	42
6.1 FATTORI BASATI SULLE ATTIVITA'	42
6.2 FATTORI BASATI SULLA POSTAZIONE DI LAVORO	43
6.3 METODOLOGIA DEL MODELLO	43
6.4 COMMENTO E CONCLUSIONI	45
VII. CONCLUSIONI	47
VIII. BIBLIOGRAFIA	50

SOMMARIO

Comprendere il carico di lavoro cognitivo è diventato un argomento fondamentale per i ricercatori nello sviluppo di sistemi futuri. La ricerca attuale si è principalmente soffermata e ha studiato misurazioni di performance, soggettive e fisiologiche dell'operatore con carico di lavoro cognitivo.

In questo lavoro viene presentata la stima del carico di lavoro tramite il metodo COLET-Cognitive workLoad based on Eye-Tracking. In cui si utilizza il monitoraggio di movimenti oculari di un campione di individui mentre risolvono enigmi che comportano attività di ricerca visiva di varia complessità e durata. Il livello di carico di lavoro cognitivo dei partecipanti è stato valutato con il test soggettivo NASA-TLX. I risultati che le attività hanno suggerito inducono a suddividere in quattro diversi livelli il carico di lavoro cognitivo. Il multi-tasking e la pressione di una tempistica ridotta hanno evidenziato un livello più elevato di carico di lavoro cognitivo rispetto a quello indotto dal single-tasking e dall'assenza di pressione del tempo.

I principali metodi utilizzati per la stima del carico di lavoro cognitivo operano offline e/o coinvolgono apparecchiature ingombranti difficilmente utilizzabili in ambienti industriali. Viene presentato anche un nuovo metodo per aggirare l'utilizzo di queste apparecchiature che opera una valutazione online del carico cognitivo nella produzione, principalmente nell'assemblaggio, rilevando i movimenti dell'operatore umano direttamente dalle immagini di input di una telecamera stereo. La stima dell'inclinazione della testa ed il tracciamento dello scheletro vengono sfruttati per indagare l'attenzione dei lavoratori e valutare l'iperattività e i movimenti imprevisti. Test effettuati con questo metodo suggeriscono che questo strumento di valutazione fornisce informazioni significative sul carico di lavoro mentale dei lavoratori, confermato anche da correlazioni con misurazioni fisiologiche e prestazionali. Secondo i dati raccolti in questo studio, questo metodo ha il potenziale per essere integrato nello sviluppo di sistemi meccatronici per migliorare l'ergonomia cognitiva nella produzione.

Inoltre, viene riportato brevemente anche il metodo CLAM che è costituito da undici fattori di valutazione, tutti utilizzando la terminologia comune dell'industria manifatturiera. Tutti i fattori sono valutati su una scala da 0 a 8, dove la valutazione più alta indica un compito cognitivamente più impegnativo.

1. INTRODUZIONE

La tendenza in atto verso l'Industria 4.0 ha rivoluzionato i luoghi di lavoro ordinari, modificando profondamente il ruolo svolto dall'uomo nella filiera produttiva. La ricerca sull'ergonomia negli ambienti di lavoro industriali si concentra principalmente sulla riduzione dell'affaticamento fisico e del disagio dell'operatore per migliorare la produttività ed evitare rischi per la sicurezza.

Il carico di lavoro cognitivo è diventato un importante aspetto da comprendere durante la progettazione e lo sviluppo dei sistemi produttivi, ancor di più ora con l'affermarsi dell'industria 4.0 e della produzione cognitiva. Comprendere lo stato di un operatore è diventato quindi un aspetto fondamentale e comunemente studiato nel dominio dell'interazione uomo-macchina.

Con questo documento si mira a “riportare” lo stato degli studi sulla valutazione del carico di lavoro mentale di un operatore che svolge attività, riportando e analizzando i principali approcci che fino ad ora hanno dimostrato dei riscontri attendibili.

La comprensione di questo argomento è fondamentale per il successo della riprogettazione e dello sviluppo di sistemi industriali che incorporano operatori umani.

Gran parte della ricerca sul carico di lavoro cognitivo ha studiato l'uso di misurazioni fisiologiche, soggettive e prestazionali.

La ricerca, osservando ciascuno di questi tipi di misurazione ha identificato sia i loro vantaggi che gli svantaggi; tuttavia, si conclude che l'utilizzo di misurazioni fisiologiche e l'individuazione di schemi motori consentono una misurazione più oggettiva del carico di lavoro cognitivo. Un sistema fisiologico con collegamenti promettenti per la valutazione e la previsione del carico di lavoro cognitivo sono le misurazioni dell'occhio umano.

L'obiettivo di questi metodi è quello di fornire dei dati utilizzabili in fase di progettazione dei sistemi produttivi per permettere una miglior integrazione degli operatori con le nuove apparecchiature digitali e interazioni uomo-robot, minimizzandone così il rischio ergonomico e cognitivo.

Un'alternativa che viene proposta al metodo basato sul tracciamento oculare ed al metodo Vision-Based è l'utilizzo del metodo CLAM in un progetto di test misto che include approcci quantitativi e qualitativi come ad esempio: visite sul campo, ispezioni di applicabilità, valutazioni soggettive del carico di lavoro mentale attraverso NASA-TLX. Approccio che mira ad analizzare maggiormente aspetti volti al benessere dell'operatore e la sostenibilità economica del modello ponendo in seconda linea le prestazioni dell'impianto industriale. [1][4][8][10]

2. PANORAMICA

2.1 MENTAL/COGNITIVE WORKLOAD

Il carico di lavoro mentale descrive le esigenze di risorse mentali per la soddisfazione di richieste/tasks, più o meno allo stesso modo in cui il carico di lavoro fisico caratterizza la richiesta di energia sui muscoli.

In termini più tecnici può essere identificato come ritardi osservati nell'elaborazione di informazioni quando l'individuo è sottoposto a significative quantità di sforzo mentale.[1]

Il carico di lavoro non è determinato solo dai compiti, ogni utente ha caratteristiche diverse e sviluppa le proprie strategie per far fronte al problema. Persone diverse con esperienze e capacità diverse possono gestire lo stesso compito o attività in modo diverso. Pertanto, il carico di lavoro cognitivo può essere anche descritto come l'esperienza soggettiva dello svolgere un compito con determinate caratteristiche. [2]

Ad esempio, un addetto che esegue un'attività di assemblaggio manuale è costantemente esposto a situazioni con esigenze mentali variabili in base alla natura delle richieste. Gli aspetti di queste richieste da considerare sono la quantità di informazioni, la pressione del tempo, le interruzioni, le decisioni rapide, le dimensioni dei lotti dei componenti e il layout fisico della postazione di lavoro.

Come visto nelle affermazioni precedenti esistono molteplici definizioni del carico di lavoro mentale poiché non esiste una definizione universalmente accettata del termine.[1]

Questo dovuto soprattutto al fatto che la natura del lavoro umano è cambiata radicalmente dal lavorare con il corpo a lavorare maggiormente con la mente man mano che i sistemi industriali sono diventati più automatizzati. Inoltre, la maggiore responsabilità della tecnologia e l'uso di procedure complesse hanno imposto un maggiore sforzo mentale/cognitivo agli operatori. [5]

Tuttavia, grazie al consenso generale, il carico di lavoro può essere riassunto come l'interazione tra il livello di struttura dei compiti con le capacità, la motivazione e lo status dell'operatore umano. Il carico di lavoro cognitivo descrive le esigenze dei compiti, sia cognitive che mentali, richieste per avere la capacità di elaborazione delle informazioni del cervello.[1]

2.2 L'IMPORTANZA IN FASE DI PROGETTAZIONE DEI SISTEMI

Le nuove tecnologie e i paradigmi dell'Industria 4.0 portano a un cambiamento del ruolo dell'operatore. Secondo recenti studi scientifici, nei prossimi anni i lavoratori saranno impiegati più in compiti cognitivi che fisici a causa della crescente adozione di dispositivi innovativi e autonomi nel processo produttivo. Gli operatori sono esposti a rischi di sovraccarico fisico e cognitivo in particolare nelle catene di montaggio.[4]

Il carico di lavoro cognitivo è diventato un concetto comunemente studiato nelle interazioni uomo-computer, in particolare come parte integrante della comprensione dello stato dell'operatore. Il concetto di carico di lavoro cognitivo è utile per spiegare gli errori nelle prestazioni umane in termini di sovraccarico, ovvero al verificarsi di una diminuzione delle prestazioni mentali dell'operatore. Di conseguenza, la gestione del carico di lavoro cognitivo consente ad un operatore di sostenere o raggiungere i livelli di prestazione desiderati. Inoltre, comprendere lo stato cognitivo di un operatore può essere importante nel momento in cui si comprende che sono necessarie differenti o ulteriori conoscenze per svolgere un determinato compito, evitando così di sovraccaricare l'operatore. Infatti, secondo *Haapalainen, Kim, Forlizzi e Dey (2010)*, "presentare informazioni al momento sbagliato può aumentare drasticamente le richieste cognitive, può avere un impatto negativo sulle prestazioni del compito e sullo stato emotivo, e in casi estremi, portare l'operatore in pericolo di vita".

Identificare il livello di carico di lavoro cognitivo, sospetti di sovraccarico e cambiamenti nelle prestazioni sono quindi fondamentali per molti aspetti di sistema e, data la loro utilità, sono in atto molti sforzi per scoprire e identificare quelle misurazioni del carico di lavoro. Condivisa è infatti l'idea che avere gli strumenti per prevenire errori di elaborazione delle informazioni per l'uomo è di cruciale importanza per ottimizzare l'interazione dell'operatore con sistemi che comportano rischi.[1]

2.3 L'IMPATTO DELL'INDUSTRIA 4.0

Il rapido progresso di tecnologie come il cloud computing, i big data, l'Internet mobile, la realtà aumentata (AR), la realtà virtuale (VR) e l'intelligenza artificiale (AI) ha portato a un lavoro cognitivo/mentale sostanziale per gli operatori. Inoltre, la combinazione di queste tecnologie dell'informazione e dell'industria manifatturiera ha suscitato l'attuale questione recentemente dibattuta della produzione intelligente (IM).

Considerando tutti i fattori che possono compromettere le prestazioni manifatturiere nell'Industria 4.0, il carico cognitivo ha ricevuto maggiore attenzione, in quanto precedentemente trascurato nelle industrie manifatturiere. Nell'industria ora è consuetudine utilizzare la produzione cognitiva grazie a strumenti come l'Internet Of Things (IoT) e analisi avanzate per aggiornare i processi di produzione in modi che prima non erano concepibili, consentendo alle aziende di migliorare le principali misurazioni aziendali; ad esempio, produttività, affidabilità del prodotto, qualità e sicurezza, riducendo al contempo i tempi di inattività e abbassando i costi. L'avvento dell'industria 4.0 ha portato a problemi opposti a quelli a cui erano abituati i produttori, infatti, per la maggior parte di loro, disporre di informazioni sufficienti non è più un problema. In effetti, la maggior parte dei produttori ha a che fare con più informazioni di quelle che possono elaborare.

L'entusiasmo per gli aspetti cognitivi delle prestazioni umane si è drasticamente ampliato negli ultimi tempi nella produzione rivolgendo i riflettori anche agli aspetti cognitivi e al loro impatto sulle prestazioni umane e sui risultati della produzione. [6]

3. MENTAL/COGNITIVE WORKLOAD MEASUREMENTS

3.1 VARIABILI

La ricerca condotta fino ad oggi ha dimostrato che il carico di lavoro cognitivo può essere valutato attraverso tre punti di vista: soggettivo, fisiologico e della performance.

Per soggettivo si intendono le misurazioni che si basano sui giudizi degli operatori in termini di carico di lavoro associato all'esecuzione di un compito o di una operazione di sistema. Le misurazioni fisiologiche valutano le risposte fisiologiche dell'operatore con le richieste del sistema o del compito. Per performance si intendono le misurazioni che valutano il carico di lavoro attraverso la capacità di un operatore di eseguire compiti o operazioni di un sistema.

Le misurazioni fisiologiche vengono utilizzate per valutare il carico di lavoro cognitivo in base al presupposto che con un aumento delle richieste di compiti, si possono osservare notevoli cambiamenti fisiologici. La selezione per l'uso di una o più di queste variabili può dipendere da diversi fattori, uno dei quali è l'uso di un particolare tipo di applicazione.

Usando tecniche di misurazione soggettiva si hanno i vantaggi di facilità d'uso e basso costo per i ricercatori; possono essere multidimensionali e avere la capacità di permettere una misura predittiva del carico di lavoro di un sistema in progettazione. Le misure di performance hanno il vantaggio di essere oggettive e solitamente non intrusive. Sono stati riscontrati anche alcuni svantaggi, per esempio è stato riscontrato che con le misure soggettive “i partecipanti al test hanno difficoltà nel distinguere la complessità del compito con lo sforzo necessario per svolgerlo” [7]. O ancora, è possibile la perdita di informazioni critiche quando c'è un lungo ritardo tra le valutazioni soggettive dell'operatore e il completamento della mansione. Solo fornendo approfondimenti indiretti sul carico di lavoro cognitivo sono stati evidenziati questi svantaggi sia per le misurazioni di performance che per le misurazioni soggettive. Anche le misure fisiologiche hanno i loro svantaggi, infatti le tecniche per registrare queste misurazioni sono più costose rispetto a quelle usate per le misure soggettive o di performance. Esiste anche un problema più grande che è quello della distinzione tra segnale e disturbo per le misurazioni di tipo psicologico. Tuttavia, i punti a favore superano di gran lunga i punti a sfavore, tali punti di forza includono la capacità di registrare una misurazione in assenza di comportamento e fornire misure che rispondono rapidamente ai cambiamenti di carico di lavoro.

Inoltre, l'utilizzo di misure psicologiche può fornire delle misure più oggettive del carico di lavoro cognitivo, oltre a soddisfare la necessità di valutazioni automatiche in tempo reale; questo include la possibilità di valutare il carico di lavoro anche quando non viene rilevato un cambiamento nelle prestazioni di lavoro. In altre parole, questo tipo di misurazione è spesso più attraente come approccio di valutazione da quando può essere ottenuta senza intervento di una risposta soggettiva

dell'operatore o attraverso una risposta prestazionale. Nella Tabella 3.1.1 abbiamo riassunto i principali vantaggi e svantaggi per ogni variabile. [1]

Measurement Type	Advantages	Disadvantages
Performance	Objective	Indirect insights about workload
	Nonintrusive	Insensitive sometimes to variations in workload at low to moderate levels of demand
Subjective	Low cost	Difficulties distinguishing task demands from invested effort
	Ease of use	
	Multidimensional	Indirect insights about workload
	Predictive assessment capabilities	Loss of critical rating information with extended delays
Physiological	Direct measurements over time	Difficulty discriminating between signal and noise.
	Recorded in the absence of behavior	
	Unobtrusive	
	Responds quickly to shifts in workload	Expensive recording techniques
	Multidimensional	
	Unbiased	

Tab. 3.1.1 Vantaggi e svantaggi delle 3 variabili principali.[1]

3.2 INDICE TLX DELLA NASA

Ottenere livelli di carico di lavoro mentale durante l'esecuzione del compito è una procedura difficile. Il livello di carico di lavoro sperimentato da un operatore può influire sulle prestazioni dell'attività. Questo effetto può essere causato da un carico di lavoro mentale eccessivo o ridotto. Pertanto, la stima dei livelli del carico di lavoro può aiutare a isolare le fonti che influiscono sulle prestazioni. Diverse tecniche possono essere utilizzate per misurare il carico di lavoro dell'operatore. Le misurazioni psicofisiologiche mediante elettroencefalogramma (EEG) sono state utilizzate con molto successo. Tuttavia, le macchine EEG non sono i dispositivi più portatili, pratici o diffusi, il che limita la loro utilità negli esperimenti. Ottenere dati sul carico di lavoro mentale è un compito non banale e c'è stata una grande quantità di lavoro sulla progettazione di dispositivi di misurazione del carico di lavoro leggeri e portatili. Le tecniche di valutazione del carico di lavoro dovrebbero possedere le seguenti proprietà: sensibilità, capacità diagnostiche, selettività, bassa intrusività, affidabilità e facilità di

implementazione. Il Task Load Index (TLX) della NASA ha dimostrato di soddisfare questi criteri. È una tecnica di valutazione soggettiva del carico di lavoro che si basa su un costrutto multidimensionale per derivare un punteggio complessivo ottenuto da una media ponderata delle valutazioni di sei parametri, che si possono trovare approfonditi nella Tabella 3.2.1: richiesta mentale, richiesta fisica, domanda temporale, prestazione, sforzo e livello di frustrazione. È stato riscontrato che l'uso di questi sei parametri per calcolare un punteggio complessivo del carico di lavoro riduce la variabilità tra i soggetti, rispetto ad una valutazione del carico di lavoro unidimensionale, fornendo al contempo informazioni diagnostiche sulle fonti del carico di lavoro.

NASA-TLX Rating Scale Descriptions		
Title	Endpoints	Description
Mental Demand	Low/High	How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?
Physical Demand	Low/High	How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?
Temporal Demand	Low/High	How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?
Performance	Good/Poor	How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?
Effort	Low/High	How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?
Frustration Level	Low/High	How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed or secure, gratified, content, relaxed, and complacent did you feel during the task?

Tab. 3.2.1 Descrizione dei sei parametri.[3]

Gli studi hanno esplorato la relazione tra le valutazioni TLX della NASA e altri fattori di prestazione, come la fatica, lo stress, la fiducia e consapevolezza situazionale. Uno dei motivi principali della popolarità del NASA-TLX tra i ricercatori è la sua facilità di implementazione. La multidimensionalità del NASA-TLX consente un'analisi più dettagliata della fonte del carico di lavoro rispetto ad altre tecniche che si basano principalmente sulle classifiche delle fonti del carico di lavoro mentale.[3]

2.2.1 PROCEDURA NASA-TLX

Il TLX della NASA è composto da due parti: valutazioni e pesi. Le valutazioni per ciascuno dei sei parametri sono ottenute dai soggetti dopo il completamento di un compito. Ad ogni parametro viene assegnato un punteggio numerico da 0 a 100 (dal minimo al massimo). I pesi sono determinati dai soggetti determinando quale parametro per loro è la più rilevante. I pesi vanno da 0 a 5 (dal meno al

più rilevante). Le valutazioni e i pesi vengono quindi combinati per calcolare una media ponderata per un punteggio complessivo del carico di lavoro. [3]

2.3 WORKLOAD PROFILE

Degno di una menzione è il workload profile. Questo strumento di valutazione utilizza i dati di otto dimensioni sulle richieste imposte da un'attività: elaborazione percettiva/centrale, esecuzione, elaborazione spaziale, elaborazione verbale, elaborazione visiva, elaborazione uditiva, output manuale e output vocale. Questo metodo fornisce una valutazione complessiva per ciascuna attività, nonché una valutazione per ciascuna delle dimensioni del carico di lavoro. Utilizza una scala di valutazione da 0 a 1 per ciascuna delle dimensioni del carico di lavoro mentale. Queste valutazioni multidimensionali dovrebbero fornire una buona rappresentazione dell'affaticamento mentale al fine di diagnosticare il livello in cui il compito è impegnativo.[3]

4. EYE TRACKING-METODO COLET

4.1 MISURAZIONI OCULARI DEL CARICO DI LAVORO COGNITIVO

Le misurazioni fisiologiche comprendono quelle ottenute attraverso i diversi sistemi del corpo umano. Una disciplina che utilizza queste misurazioni fisiologiche è quella della fisiologia oftalmica. Lo studio dei movimenti oculari e dell'eye-tracking in realtà precede l'uso dei computer, ma non ha prosperato fino agli anni '70 con i progressi nella tecnologia per il tracciamento oculare e con lo sviluppo di una teoria fisiologica collegata ai dati raccolti con il tracciamento oculare nei processi. Questa ricerca ha continuato ad evolversi con i progressi tecnologici fino a diventare un mezzo di interazione uomo-computer. Attualmente, questa tecnologia prevede l'uso di registrazioni video dell'occhio in tempo reale da telecamere ad alta velocità posizionate su una fascia che avvolge la testa o sul monitor di un computer. Attraverso questi mezzi, i dati possono essere raccolti in qualsiasi ambiente senza interferire con le prestazioni dell'operatore.

L'utilizzo della tecnologia dell'eye-tracking per i ricercatori risulta essere una misurazione più obiettiva del carico di lavoro cognitivo di un operatore attraverso movimenti oculari e risposte pupillari. Rispetto ad altre misurazioni fisiologiche, ci sono molti vantaggi associati all'uso dei movimenti oculari nei sistemi adattivi, e quindi nell'identificazione del carico di lavoro cognitivo. I vantaggi individuati includono l'insensibilità ai movimenti degli arti, può essere regolato in modo da non essere influenzato dai movimenti della testa, e l'attrezzatura richiesta per l'osservazione e la registrazione dei movimenti oculari non richiede grandi quantità di addestramento per l'impostazione, inoltre la procedura di calibrazione può essere completata piuttosto rapidamente. Inoltre, si afferma che "un'utile misurazione fisiologica per lo sforzo mentale dovrebbe essere sensibile sia alle variazioni tra le attività che all'interno delle attività". Le misurazioni relative agli occhi soddisfano questi criteri.[1]

La relazione tra carico di lavoro cognitivo e misurazioni relative agli occhi è stata precedentemente studiata in molte occasioni, con alcune misurazioni studiate più frequentemente di altre. Alcune delle misurazioni relative agli occhi sono correlate ai battiti di ciglia; questi includono la frequenza del battito, la durata del battito e infine la sua latenza. Altre misurazioni sono caratterizzazioni delle fissazioni oculari, tra cui il numero di fissazioni, la durata della fissazione, la durata saccadica, la velocità di picco saccadica e la distribuzione dello sguardo. Una delle misurazioni più comunemente studiate è quella del diametro della pupilla, nota anche come pupillometria. Il diametro, o dimensione, della pupilla è stato spesso al centro di studi e osservazioni, Hess and Polt conclude che "la risposta della pupilla non solo indica l'attività mentale in sé, ma mostra che l'attività mentale è strettamente correlata alla difficoltà del problema e che la dimensione della pupilla aumenta con la difficoltà del problema".

Tuttavia, le misurazioni che coinvolgono la pupilla, non sono sempre prive di errori poiché i maggiori cambiamenti nella pupilla possono verificarsi in risposta a fattori diversi dal carico di lavoro cognitivo. Alcune delle principali variazioni della pupilla si verificano al di fuori della quantità di stimolazione mentale, come i cambiamenti nella quantità di luce che entra nell'occhio o dallo spostare il focus da un oggetto lontano a uno vicino.

Il battito di ciglia è anche collegato a determinati processi cognitivi. Holland e Tarlow (1975) hanno scoperto che la frequenza di battito si riduce significativamente durante l'elaborazione delle informazioni in memoria. Indicazioni sulla relazione tra battito di ciglia e processi cognitivi risalgono addirittura a Telford e Thompson (1933), che dimostrarono che il battito di ciglia si riduceva durante compiti che richiedevano concentrazione e intensa stimolazione mentale. La relazione tra frequenza di battito e richieste del compito è spesso attribuita ai tentativi dell'operatore di ridurre al minimo la possibilità di perdere informazioni importanti [9]. Altri studi hanno anche portato a scoperte come una diminuzione della frequenza di battito con aumenti della domanda cognitiva. Allo stesso modo, la durata del battito mostra una tendenza a diminuire durante l'aumento dello sforzo visivo.

La continua ricerca ha fornito altre misurazioni dall'occhio arrivando a confermare una relazione con il carico di lavoro cognitivo. Ad esempio, si possono ottenere risultati radicalmente diversi quando vengono apportate modifiche anche minime ai parametri che definiscono una fissazione; tuttavia, si ritiene generalmente che il tempo di permanenza e la durata della fissazione aumentino con un aumento del carico di lavoro cognitivo. Recenti ricerche hanno anche indicato che la dimensione del campo visivo funzionale diminuisce con l'aumentare della difficoltà del compito.

Come discusso in precedenza, differenti misure rilevate dagli occhi identificano un aumento o una diminuzione del carico di lavoro cognitivo. Un riassunto di queste misurazioni relative agli occhi osservate negli ultimi anni di studi e il conseguente aumento o diminuzione del carico di lavoro cognitivo sono riassunte nella Tabella 4.1.1.

Indicator of Increased Cognitive Workload	
↑	Blink Duration
↑	Blink Interval
↑	Blink Frequency
↑	Saccade Rate
↑	Saccade Peak Velocity
↑	Saccade Amplitude
↑	Pupil Size
↑	Pupil Dilation
↑	Fixation Frequency
↑	Fixation Duration
↑	Horizontal Fixation
↑	Vertical Fixation
↑	Mean Dwell Time
↓	Saccade Extent
↓	Blink Rate
↓	Area of Visual Field

Tab. 4.1.1 Riepilogo delle misurazioni relative agli occhi e loro relazione con l'aumento del carico di lavoro cognitivo. [1]

Essere in grado di comprendere la relazione tra il carico di lavoro cognitivo e le misurazioni relative agli occhi potrebbe aiutare a raggiungere una maggiore affidabilità nel rilevare gli stati cognitivi dell'operatore.[1]

4.2 METODO COLET

In questo lavoro, presentiamo COLET (COgnitive workLoad estimation based on Eye-Tracking): un set di dati per la stima del carico di lavoro cognitivo basato sull'eye-tracking. Il set di dati esplora la possibilità di analizzare i livelli di CW (cognitive workload) indotti da puzzle di ricerca visiva insieme a compiti secondari eseguiti da diversi utenti. La raccolta contiene le registrazioni dei movimenti degli occhi e dello sguardo di 47 partecipanti e i loro punteggi delle prestazioni durante la risoluzione

di enigmi simili a captcha relativi alle attività di ricerca visiva. La ricerca visiva è una caratteristica molto importante dell'attività umana e molti studi hanno valutato il carico di lavoro cognitivo durante la ricerca visiva. Il puzzle captcha è stato scelto perché è un'attività che di solito si incontra nel mondo reale. I segnali registrati contengono una serie di metriche relative alle posizioni dello sguardo, agli ammiccamenti e alle caratteristiche della pupilla, consentendo l'estrazione e l'analisi di un'ampia varietà di caratteristiche dell'occhio, come le fissazioni e le saccadi. Dopo la conclusione di ciascuna attività, sono state raccolte le valutazioni degli individui in relazione a una versione semplificata dello strumento dell'indice di carico di attività NASA-TLX, è una valida misura multidimensionale del CW comunemente usata dagli esperti come descritto in precedenza. Inoltre, questo lavoro offre un'ampia descrizione delle tecniche di elaborazione dei dati dell'occhio e dello sguardo applicate dall'inizio del processo di registrazione, inclusa la pipeline computazionale per l'estrazione delle caratteristiche relative a fissazione, battito di ciglia, saccade e pupilla. Infine, le informazioni degli occhi e sguardi fornite sono state esaminate con dei classificatori di machine learning per fornire una stima del CW, dimostrando risultati importanti per quanto riguarda la capacità di previsione dei modelli. In questo documento descriviamo il protocollo da seguire per applicare il metodo COLET, i set di dati e ogni materiale utilizzato nello studio. [2]

4.2.1 PARTECIPANTI, MATERIALI E SETUP

In prima battuta è stata effettuata una selezione dei partecipanti, i criteri di esclusione per i partecipanti includevano: qualsiasi malattia oculare nota, acuità visiva binoculare corretta inferiore a 0.8, forie anormali clinicamente.

Cinquantasei (56) individui si sono offerti volontari per lo studio e nove di loro sono stati esclusi. Pertanto, l'analisi è stata eseguita per i rimanenti quarantasette (47) partecipanti (26 femmine, 21 maschi).

Il protocollo sperimentale è stato presentato (104/12-1-2021/03-2-2021) e approvato (110/12-02-2021) dal Comitato etico della Fondazione per la ricerca e la tecnologia Hellas (FORTH).

Una serie di 21 immagini di interni è stata scelta dal database gratuito Indoor Scene Recognition. Ad ogni immagine è stata aggiunta una griglia, dividendola così in nove (9) quadrati uguali come mostrato in Fig. 4.2.1.3. Ogni immagine è stata selezionata in modo che su alcuni dei nove quadrati fosse presente un oggetto specifico, così da sembrare un captcha puzzle. Ai partecipanti è stato chiesto di individuare e indicare i quadrati del puzzle con un determinato oggetto. Questo consisteva nel compito principale.

Un compito di interferenza è stato anche proposto ai partecipanti come compito secondario, durante il quale ai partecipanti è stato chiesto di contare ad alta voce e all'indietro partendo da 1000 sottraendo 4.

Le immagini sono state presentate sullo schermo di un computer (LCD, 24", 1280x720) a una distanza di 80 cm dal partecipante, come mostrato in Fig. 4.2.1.1.

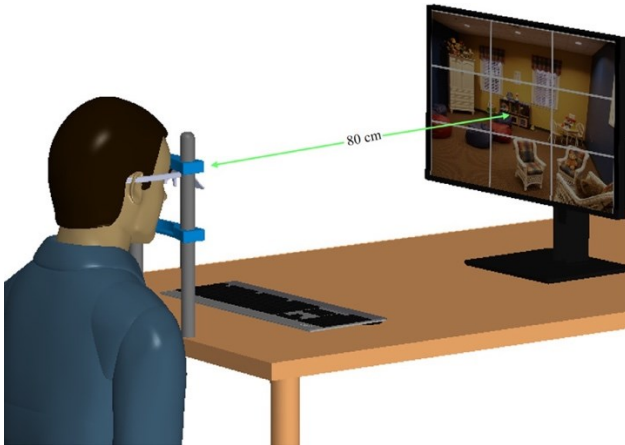


Fig.4.2.1.1 Rappresentazione grafica del setup.[2]



Fig.4.2.1.3 Esempio del test CAPTCHA, istruzione: indicare i riquadri in cui è presente un puff. [2]

Le misurazioni del tracciamento oculare sono state registrate utilizzando il tracciatore oculare "Pupil Core" di "Pupil Labs". Tutte le misurazioni sono state eseguite con i partecipanti seduti su una sedia con la testa stabilizzata mediante un poggiatesta e un poggia mento per ridurre al minimo i movimenti della testa. Inoltre, è stata sviluppata un'API in ambiente di programmazione Python per comunicare con l'eye-tracker e per abilitare/disabilitare la procedura di acquisizione dei dati dell'occhio e dello sguardo in base alla fase dell'esperimento, nonché per identificare possibili errori del partecipante durante la procedura descritta nei paragrafi successivi. L'API era anche responsabile della raccolta dei dati relativi all'occhio e allo sguardo dopo la fine di ogni prova e al loro salvataggio con l'appropriata etichettatura. Infine, è stata progettata una Graphical User Interface (GUI) in ambiente di programmazione Python, al fine di dare le opportune istruzioni ai partecipanti in merito alla procedura sperimentale e alla sequenza delle attività. Utilizzando questa GUI, i partecipanti potevano navigare attraverso le fasi sperimentali e anche annullare la procedura nel caso lo avessero deciso. L'integrità della visione dei partecipanti è stata valutata in termini di acuità visiva e coordinazione binoculare. L'acuità visiva è stata misurata con le carte logMAR standardizzate a livello europeo. Le registrazioni sono state eseguite in condizioni di illuminazione controllata, ottenute con le luci della stanza accese. [2]

4.2.2 PROCEDURA DELL'ESPERIMENTO

Dopo aver effettuato tutte le procedure per la messa in sicurezza e compilato alcuni moduli è stato condotto un test con un'immagine casuale per consentire al partecipante di familiarizzare con il processo. Dopo il test, è iniziata la parte principale dello studio.

Lo studio ha utilizzato un disegno fattoriale due per due, con i due fattori che sono: vincolo di tempo (con o senza) e compito (singolo o multiplo). Il vincolo di tempo è stato imposto istruendo i partecipanti a completare l'attività "il più rapidamente possibile", mentre "nessun vincolo di tempo" è stato introdotto istruendo i partecipanti a completare l'attività "a un ritmo confortevole".

Il compito singolo consisteva nel suddetto compito principale e il multitasking consisteva nel compito secondario insieme al compito principale. L'interazione dei due fattori ha portato alla realizzazione di quattro attività sperimentali;

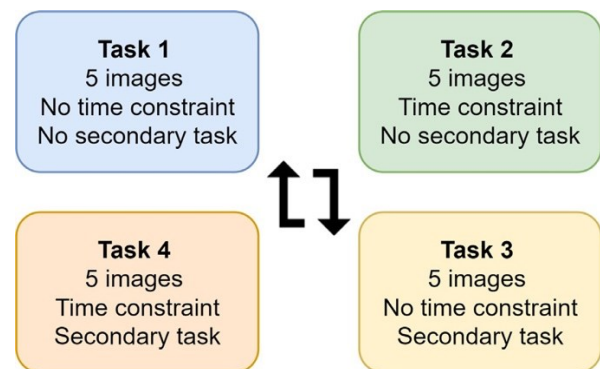


Fig.4.2.2.1 Disegno fattoriale delle 4 attività svolte.[2]

Attività 1: nessun vincolo di tempo e compito singolo, Attività 2: vincolo di tempo e compito singolo, Attività 3: nessuna pressione del tempo e multitasking, Attività 4: vincolo di tempo e multitasking (Fig. 4.2.2.1).

Ogni attività consisteva in cinque immagini/prove. Per ogni partecipante, le attività sono state presentate in ordine casuale e per ciascuna attività sono state selezionate casualmente cinque immagini dal pool di immagini, al fine di evitare qualsiasi effetto di apprendimento e fatica.

Alla fine di ogni attività ai partecipanti è stato chiesto di compilare una versione semplificata del questionario NASA-TLX, uno strumento soggettivo di valutazione del carico di lavoro.

Un'immagine tra quelle utilizzate nella procedura sperimentale è mostrata in Fig.4.2.1.3. Durante tutta la procedura di completamento dell'attività, un membro del gruppo di ricerca ha monitorato l'output del tracciatore dello sguardo su un secondo schermo nel caso in cui si verificassero anomalie nelle registrazioni o se il partecipante avesse bisogno di ulteriore assistenza. [2]

4.2.3 VALUTAZIONE DEL CARICO DI LAVORO COGNITIVO

Sono state utilizzate una varietà di misure per valutare il carico di lavoro cognitivo e possono essere suddivise in tre categorie; misure soggettive, misure di performance e misure fisiologiche.

La valutazione del CW è stata valutata solo per il compito principale, poiché il compito secondario è stato utilizzato come mezzo per indurre il CW ai partecipanti durante l'esecuzione del compito principale. [2]

4.2.3.1 MISURE SOGGETTIVE

Per questo studio è stata utilizzata una versione semplificata della scala NASA-TLX, chiamata NASA RTLX, proposta da Byers. Le scale nella versione semplificata sono le seguenti: Esigenza Mentale, Esigenza Fisica, Esigenza Temporale, Performance, Sforzo e Frustrazione.

Un esempio di domanda NASA-TLX è quella relativa alla domanda mentale: “Quanta attività mentale e percettiva è stata richiesta? L'attività era facile o impegnativa, semplice o complessa? Le scale sono classificate entro un intervallo di 100 punti con incrementi di 5 punti. Oltre alle valutazioni delle sei scale, è stato valutato anche il valore medio delle sei valutazioni. Maggiore è il valore medio, maggiore è il carico di lavoro cognitivo sperimentato. [2]

4.2.3.2 MISURE DI PERFORMANCE

Durante tutte le prove e le attività, è stato misurato il numero di errori e quadrati mancanti. Inoltre, è stato misurato il tempo necessario per completare una prova ed è stato indicato come tempo di reazione (RT). Uno strumento per combinare velocità di risposta ed errore è l'Inverse Efficiency Score (IES) che è ampiamente utilizzato. Per un dato partecipante, IES è calcolato come RT medio in una particolare condizione diviso per la percentuale di risposte corrette (PC). PC è stato calcolato come il numero delle risposte corrette diviso per la somma delle risposte corrette, sbagliate e mancate. [2]

4.2.3.3 MISURE FISILOGICHE

Le misure fisiologiche sono state ricavate dai dati dell'eye tracker. Sono in totale 28 misure e sono correlate a fissazione, saccade, ammiccamento e pupilla, inclusa l'asimmetria dei dati, la curtosi e il coefficiente di variazione (CV) per ogni caratteristica dell'occhio. L'asimmetria è una misura della simmetria di una distribuzione, mentre la curtosi è una misura del fatto che una distribuzione abbia una coda pesante o una coda leggera rispetto a una distribuzione normale. Il coefficiente di variazione mostra l'entità della variabilità in relazione alla media della popolazione ed è un numero dimensionale. È definito come il rapporto tra la deviazione standard e la media di una popolazione.

Per facilità di lettura, verrà indicato come Variazione. Una presentazione dettagliata delle caratteristiche studiate è fornita nelle sezioni a seguire. [2]

4.2.4 PRIMA ANALISI DEI DATI

Quando si raccolgono i dati, è tipicamente presente un po' di disturbo a causa dell'ammicciamento degli occhi e dell'incapacità di catturare i riflessi corneali (cioè la perdita del segnale). L'output del tracker dello sguardo include le posizioni dello sguardo (coordinate x, y), i tempi di ammicciamento (ora di inizio e di fine) e il diametro della pupilla in mm. Queste misure includono una varietà di fonti di disturbi, tra cui l'eye-tracker e i partecipanti. Viene effettuato un lavoro di filtraggio per eliminare questa volatilità indesiderata nei dati sui movimenti oculari.

Le coordinate grezze dello sguardo in forma di pixel normalizzati vengono convertite in gradi dell'angolo visivo e viene determinato il movimento istantaneo dello sguardo da campione a campione tra due posizioni consecutive dello sguardo, risultando nel calcolo della velocità angolare alla frequenza di campionamento specificata Fs. [2]

4.2.4.1 RILEVAMENTO SACCADE E FISSAZIONE

In questo lavoro, le fissazioni e le saccadi sono identificate sulla base dell'algoritmo Velocity-Threshold Identification (I-VT) [49] a causa della sua superiorità quando si considerano i confronti campione per campione. Inoltre, è stato introdotto un ulteriore criterio di tempo minimo per valutare la durata delle fissazioni. Secondo il metodo, una soglia di velocità definita determina un punto di sguardo come fissazione o saccade. Quindi, i punti di fissazione consecutivi vengono compressi in gruppi di fissazione in base alla soglia di durata. Nell'algoritmo la soglia di velocità per il rilevamento della saccade è stata impostata a 45 gradi/sec. Inoltre, la soglia minima di durata della fissazione è stata determinata a 55 msec. [2]

4.2.4.2 RILEVAMENTO BATTITI DI CIGLIA E MISURE PUPILLARI

Le misure pupillari sono difficili da valutare, poiché il diametro della pupilla e la sua variazione dipendono fortemente da molteplici fattori che devono rimanere fissi, come le condizioni di illuminazione e le dimensioni del campo di adattamento. Nel nostro studio, la luminanza di ogni immagine può essere un fattore di variazione delle dimensioni della pupilla.

Il disegno sperimentale del presente studio è stato scelto per minimizzare il più possibile questo impatto. A seguito di alcune prove per verificare l'attendibilità delle misure pupillari i risultati sono stati considerati soddisfacenti poiché il diametro della pupilla non sembrava correlare fortemente con

la differenza di brillantezza dei colori. Pertanto, tutte le analisi sul diametro della pupilla sono state eseguite con il diametro della pupilla ottenuto dall'eye tracker. [2]

4.2.4.3 TRAINING DEL MODELLO

Sono stati utilizzati dei modelli costruiti con Python per l'analisi dell'apprendimento automatico, tentando di identificare le relazioni tra fissazione, saccade, ammiccamento e caratteristiche oculari correlate alla pupilla e le attività e i livelli di CW. Pertanto, le quattro attività svolte dai partecipanti durante la procedura sperimentale sono indicate come A1, A2, A3, A4 per le attività 1, 2, 3 e 4, rispettivamente, come mostrato in Fig. 2. Inoltre, tramite un'ulteriore Machine learning l'analisi è stata eseguita anche sulla base dei punteggi soggettivi definiti dalla scala NASA RTLX forniti dai partecipanti. La misura dell'esito relativa ai livelli di CW può avere tre valori: carico di lavoro cognitivo basso, medio e alto basato sul carico di lavoro medio che indica l'intensità del carico di lavoro percepito. Pertanto, definiamo livelli CW alti, medi e bassi con un punteggio del carico di lavoro rispettivamente tra 50–100, 30–49 e 0–29. Inoltre, contrassegniamo il CW di livello basso, medio, alto rispettivamente con la classe C0, C1 e C2. [2]

4.2.5 RISULTATI DELLO STUDIO CON NASA-TLX

La tabella 4.5.1 mostra i valori medi (\pm SD) di tutte le scale della NASA-RTLX in tutte le attività, si nota una differenza statisticamente significativa tra le attività mostrando un aumento graduale quando si passava dall'attività 1 all'attività 4 (Fig. 4.5.1A). La domanda mentale era statisticamente più alta nell'attività 2 rispetto all'attività 1 e ancora più

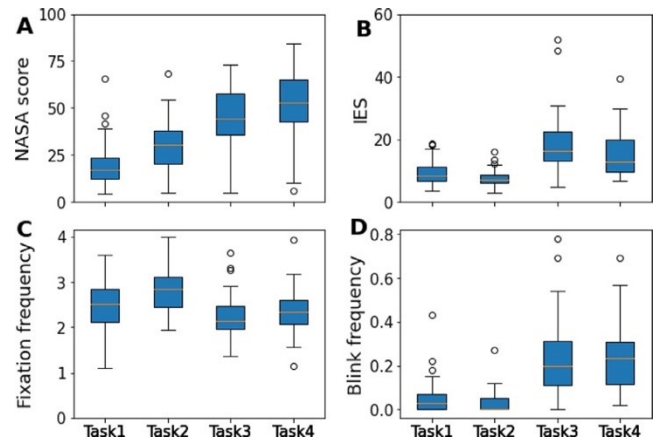


Fig.4.5.1 A) Box plots per la media del punteggio NASA, B) IES, C) frequenza di fissazione D) frequenza di battito in ogni attività.[2]

alta nell'attività 3. La domanda mentale nell'attività 4 non era significativamente diversa dalla domanda mentale nell'attività 3. La richiesta temporale era più alta nell'attività 2 rispetto all'attività 1 e più alta nell'attività 4 rispetto all'attività 3, come previsto. Le prestazioni e la frustrazione erano statisticamente e significativamente diverse solo tra le attività singole (1 e 2) e doppie (3 e 4), mentre lo sforzo era statisticamente e significativamente diverso tra tutte le coppie ad eccezione dell'attività 3 e dell'attività 4. Si è potuto anche evidenziare che il numero medio di errori per attività, il tempo totale necessario per completare un'attività (tempo di reazione, RT) e l'Inverse Efficiency Score (IES)

differivano in modo statisticamente significativo tra le diverse attività. Diventa quindi evidente che il carico di lavoro cognitivo aumenta man mano che si passa dall'attività 1 all'attività 4. Tra tutte le misure, il punteggio medio della NASA sembra essere la misura che può distinguere meglio le attività. Pertanto, d'ora in poi, il carico di lavoro cognitivo (CW) sarà considerato come segue: $CW_{activity1} < CW_{activity2} < CW_{activity3} < CW_{activity4}$.

NASA RTLX scores (\pm SD).

Subscale	Act. 1	Act. 2	Act. 3	Act. 4
Mental Demand	25.6 (\pm 18.2)	36.7 (\pm 23.8)	66.9 (\pm 23.4)	72.9 (\pm 19.8)
Physical Demand	16.0 (\pm 18.2)	19.6 (\pm 15.5)	26.5 (\pm 27.0)	27.3 (\pm 25.9)
Temporal Demand	19.0 (\pm 14.8)	41.5 (\pm 27.6)	37.3 (\pm 22.8)	59.9 (\pm 28.0)
Performance	16.6 (\pm 20.0)	23.2 (\pm 17.4)	43.0 (\pm 23.5)	45.6 (\pm 24.3)
Effort	26.7 (\pm 20.0)	36.7 (\pm 23.0)	63.8 (\pm 21.8)	66.8 (\pm 21.8)
Frustration	12.5 (\pm 15.6)	17.4 (\pm 17.7)	31.6 (\pm 22.6)	40.4 (\pm 27.9)
Mean	19.4 (\pm 11.9)	29.2 (\pm 13.6)	44.8 (\pm 15.1)	52.2 (\pm 17.1)

Tab.4.5.1 Act.1: single-task e nessun vincolo di tempo, Act.2: vincolo di tempo e multi-tasks; Act.3: nessun vincolo di tempo e multi-tasks; Act.4: vincolo di tempo e multi-tasks. Alto, medio, basso rispettivamente tra 50–100, 30–49 e 0–29. [2]

4.2.5.1 ANALISI DEL MACHINE LEARNING

I risultati dello studio di classificazione utilizzando il metodo COLET sono raccolti nelle Tabelle 4.5.1 e 4.5.2. Ciascuna delle tabelle contiene le classi del rispettivo tentativo di classificazione, la dimensione del campione per ciascuna classe e i tre classificatori con le migliori prestazioni in termini di accuratezza. I parametri sono riassunti nella Tabella 4.5.3. Inoltre, il miglior algoritmo di classificazione per ogni tentativo di classificazione è evidenziato in grassetto.

Dai risultati presentati nella Tabella 4.5.1.1, attività 2 (A2) che richiedeva ai partecipanti di completare l'attività “non appena possibile” ma senza vincolo di tempo è stato distinto da A3 e A4 rispettivamente con percentuali del 93% e 98%, dimostrando l'effetto del compito secondario (vincolo di tempo) sulla differenziazione delle attività. Inoltre, il fattore di pressione del tempo ha giocato un ruolo critico nella discriminazione tra la prima (A1) e la seconda (A2) attività sperimentale con NB che raggiunge l'accuratezza dell'80%.

Superior algorithms in classifying the four experimental activities for the induction of cognitive workload.

Classes	Sample size	Superior classifiers	Acc.	Pr.	Rec.	f1
A1/A2	47/47	ENS	.75	.75	.74	.75
		RF	.79	.80	.80	.80
		NB	.80	.79	.78	.78
A1/A3	47/47	ENS	.78	.79	.79	.79
		SVM	.75	.74	.75	.74
		GNB	.81	.79	.79	.79
A1/A4	47/47	k-NN	.86	.85	.86	.85
		LR	.85	.85	.84	.85
		DT	.80	.80	.79	.80
A2/A3	47/47	SVM	.93	.92	.91	.92
		GNB	.91	.91	.90	.91
		RF	.90	.91	.91	.91
A2/A4	47/47	SVM	.98	.98	.98	.97
		GNB	.96	.94	.95	.95
		RF	.98	.97	.98	.97
A3/A4	47/47	DT	.60	.60	.60	.60
		RF	.55	.53	.54	.54
		k-NN	.55	.55	.56	.54
A1,2/A3,4	94/94	ENS	.88	.87	.88	.87
		RF	.88	.88	.87	.88
		k-NN	.90	.89	.89	.90
A1/A2/ A3/A4	47/47/ 47/47	NB	.60	.59	.59	.60
		LR	.55	.54	.54	.54
		GNB	.52	.52	.54	.51

Tab. 4.5.1.1 Algoritmi superiori nella classificazione delle quattro attività sperimentali per l'induzione del carico di lavoro cognitivo. [2]

Inoltre, l'aggiunta dell'attività secondaria ha portato all'effettiva identificazione delle classi A3 e A4 da A1 e A2 (nessuna attività secondaria) con un'accuratezza di previsione del 90% ottenuta dal classificatore k-NN, mentre i tassi di accuratezza RF ed ENS rimangono abbastanza vicini.

I risultati del nostro tentativo di prevedere i livelli di CW sulla base dei punteggi medi del NASA-TLX sono presentati nella Tabella 4.5.2. Quasi 9 esempi su 10 di CW basso (C1) e alto (C3) sono stati classificati correttamente dal classificatore GNB. Al contrario, l'identificazione dei livelli medi di CW (C2) dalle altre due classi (alta e bassa) si è rivelata particolarmente impegnativa per i classificatori. Nello specifico, gli esempi C1 e C2 sono stati classificati correttamente dal modello ENS con un tasso di accuratezza del 72%, mentre il 62% dei casi C2 e C3 è stato previsto correttamente dal classificatore DT.

Il classificatore DT si è dimostrato superiore nell'identificare correttamente il CW alto (C3) dagli altri due livelli sulla base del punteggio medio NASA-TLX con una precisione del 74%. L'ultimo

problema di classificazione è relativo alla classificazione di tre livelli di CW; alta, media e bassa. Il GNB si è dimostrato il più efficiente in termini di accuratezza raggiungendo fino al 59% di previsioni corrette. Nel complesso, i modelli GNB e DT sembravano in grado di identificare correttamente i tre livelli di CW, alto, medio e basso; tuttavia, l'inserimento della classe media ha diminuito significativamente la percentuale di accuratezza.

Classes	Sample size	Superior classifiers	Acc.	Pr.	Rec.	f1
C1/C2	71/67	ENS	.72	.72	.75	.72
		SVM	.69	.67	.68	.69
		GNB	.71	.71	.71	.72
C1/C3	71/50	SVM	.84	.82	.83	.82
		GNB	.88	.86	.86	.86
		RF	.84	.84	.85	.84
C2/C3	67/50	ENS	.58	.58	.59	.57
		RF	.54	.54	.54	.55
		DT	.62	.61	.61	.60
C1,2/C3	138/50	ENS	.72	.70	.71	.71
		RF	.72	.71	.69	.70
		DT	.74	.73	.74	.73
C1/C2/C3	71/67/50	RF	.54	.52	.51	.52
		GNB	.59	.59	.58	.59
		LR	.51	.50	.50	.50

Tab. 4.5.2 Algoritmi superiori nella classificazione di tre livelli di carico di lavoro cognitivo. [2]

Estimator	Hyperparameters tested
GNB	loss: [deviance, exponential], criterion: [friedman_mse, squared_error, mse, mae], min_samples_split: [1, 2, 5, 10]
RF	max_depth: [None, 5, 10, 20, 30], max_features: [auto, sqrt], min_samples_leaf: [1, 2, 4], min_samples_split: [2, 4, 6], n_estimators: [10, 100, 200, 500, 1000, 1200]
SVM	decision_function_shape: [ovo, ovr], gamma: [scale, auto]
EGB	criterion: [friedman_mse, squared_error, mse, absolute_error], loss: [deviance, exponential], max_depth: [None, 5, 10, 20, 30], max_features: [auto, sqrt, log2], min_samples_leaf: [1, 2, 4], min_samples_split: [2, 4, 6], n_estimators: [10, 100, 200, 500, 1000, 1200]
k-NN	algorithm: [auto, ball_tree, kd_tree, brute], leaf_size: [10, 20, 30, 40, 50], n_neighbors: [1, 3, 5, 10, 20, 30], p: [1, 2, 3, 4, 5], weights: [uniform, distance]
NB	alpha: [1.0, 2.0, 5.0, 10.0]
LR	penalty: [l1, l2, elasticnet, none], solver: [newton-cg, lbfgs, liblinear, sag, saga], multi_class: [auto, ovr, multinomial]
DT	criterion: [gini, entropy], max_depth: [None, 5, 10, 20, 30], max_features: [auto, sqrt, log2], min_samples_leaf: [1, 2, 4], min_samples_split: [2, 4, 6], splitter: [best, random]

Tab. 4.5.3 Descrizione dei parametri scelti. [2]

4.2.6 COMMENTO/INTERPRETAZIONE DEI DATI

Per evitare di risentire di un numero disponibile limitato di misurazioni dell'occhio e dello sguardo è stato utilizzato un set di dati di tracciamento oculare registrato attraverso gli occhi di 47 partecipanti per l'analisi dei livelli di carico di lavoro cognitivo, questo ha consentito una dimensione del campione molto più elevata e uno spettro più ampio di metriche dell'occhio e dello sguardo, consentendo una maggior precisione nell'individuazione degli stati cognitivi. Ogni attività differisce dalle altre in termini di vincoli di tempo e di numero di compiti ed è valutata dai partecipanti in base all'indice del carico di lavoro NASA TLX.

L'analisi statistica ha rivelato che le attività hanno indotto diversi livelli di carico di lavoro cognitivo. Sia le misure soggettive che quelle relative alle prestazioni rivelano che un compito secondario e la pressione del tempo hanno indotto un livello più elevato di CW rispetto a quello indotto dal compito singolo e dall'assenza di pressione del tempo. In tre caratteristiche è stata osservata un'interazione statisticamente significativa tra il compito e la pressione del tempo; frequenza di fissazione, variazione della velocità saccadica e variazione della velocità saccadica di picco. Un'ulteriore analisi con t-test di campioni appaiati ha mostrato che sebbene la pressione del tempo influisse sulla frequenza di fissazione, l'effetto era molto più forte quando c'era anche il compito secondario. I t-test dei campioni accoppiati hanno anche mostrato che la variazione della velocità saccadica e la variazione massima della velocità saccadica erano influenzate in modo significativo dalla pressione del tempo solo quando c'era un singolo compito e che il compito secondario aveva un effetto

significativo sulla variazione della velocità saccadica quando c'era la pressione del tempo. Il basso effetto della pressione del tempo rispetto a quello del compito secondario può essere, almeno in parte, attribuito al modo in cui la pressione del tempo è stata indotta nei partecipanti. La frequenza di fissazione e il diametro della pupilla sembrano essere le caratteristiche più sensibili in quanto mostrano un effetto significativo sia nel compito secondario che in condizioni di pressione del tempo. Questi risultati confermano ricerche precedenti e rivelano che il carico di lavoro cognitivo ha un'influenza sui movimenti oculari e sulle risposte pupillari.

Nello specifico e in linea con le idee sui livelli di carico di lavoro cognitivo possono essere riconosciuti con successo utilizzando solo le caratteristiche di tracciamento oculare. Inoltre, è stata stabilita una sostanziale correlazione tra le caratteristiche oculari e le quattro attività sperimentali, dimostrando la possibilità di sviluppare un sistema di rilevamento del carico di lavoro cognitivo con un alto grado di capacità di discretizzazione.

Tuttavia, i tentativi di classificazione tra attività che includevano o meno il compito secondario, hanno comportato una notevole perdita di prestazioni del modello, in particolare quando si distingueva tra A3 e A4. Il forte effetto della pressione del tempo nell'accuratezza del modello è confermato dalla chiara differenziazione di A1 e A2 da A3 e A4. Questo dimostra anche la rilevanza che ha un secondo compito nei livelli di CW.

Questo risultato è in linea con i punteggi NASA - TLX in cui i compiti secondari mostrano incrementi maggiori del CW rispetto ai limiti di tempo.

Nonostante i suddetti risultati, questi devono essere considerati alla luce di alcune limitazioni. Prima di tutto, la durata di ciascuna prova non era abbastanza lunga per avere robuste alterazioni del modello dello sguardo tra le prove. I valori medi delle nostre caratteristiche oculari sarebbero fortemente influenzati da qualsiasi valore estremo, poiché ci sarebbero solo pochi campioni in ciascuna prova. Inoltre, sembra che il CW indotto dal fattore di pressione temporale non sia stato elevato come previsto. Partiamo dal presupposto che le semplici istruzioni poste ai partecipanti di terminare il compito "il più rapidamente possibile", non fossero in grado di indurre un alto CW. L'uso di un conto alla rovescia visibile invece di una semplice istruzione sarebbe molto probabilmente più appropriato. Un altro fattore che potrebbe aver influenzato i nostri risultati è la dimensione degli stimoli. Immagini più piccole o un numero maggiore di quadrati potrebbero aver indotto un carico di lavoro cognitivo più elevato, poiché la dimensione degli stimoli influisce sulla ricerca visiva.

I risultati presentati in questo articolo, basati sui dati forniti da COLET, dimostrano il potenziale dell'utilizzo degli eye-tracker per individuare i vari livelli di CW, rafforzando allo stesso tempo la necessità di ricerche future. Questo modello potrebbe essere successivamente utilizzato in applicazioni pratiche, specialmente negli ambienti di lavoro, portando allo sviluppo di un sistema

decisionale che valuta lo sforzo mentale del lavoratore e fornisce raccomandazioni e consigli per una migliore gestione del tempo e del carico di lavoro.[2]

5. METODO PER LA STIMA DEL COGNITIVE WORKLOAD IN TEMPO REALE (METODO VISION-BASED)

5.1 METODOLOGIA

I metodi all'avanguardia nelle scienze cognitive possono essere utilizzati quasi esclusivamente da esperti o semplicemente fornire approfondimenti offline sul processo cognitivo (ad esempio questionari soggettivi). Un primo tentativo verso uno strumento più utilizzabile è stato fatto dal dott. Peter Thorvald dell'Università di Skövde, in Svezia, che ha sviluppato un metodo analitico, denominato Cognitive Load Assessment for Manufacturing (CLAM). Tuttavia, tale valutazione viene ancora effettuata offline, chiedendo agli utenti finali di compilare un modulo e valutare una serie di fattori associati a diversi aspetti della loro attività quotidiana. Lo scopo dello studio presentato in questo paragrafo è sviluppare un metodo quantitativo e online per esaminare come il lavoro industriale influisce sulle persone in relazione alla distribuzione dell'attenzione, al processo decisionale, al sovraccarico mentale, alla frustrazione, allo stress e agli errori. Proponiamo un framework online per monitorare il carico di lavoro cognitivo degli operatori umani rilevando modelli nel loro movimento direttamente dalle immagini di input di una stereo camera. La valutazione della posizione della testa e il monitoraggio dello scheletro vengono sfruttati per indagare l'attenzione dei lavoratori e valutare l'iperattività e i movimenti imprevisti. Ad esempio, il carico di lavoro mentale, l'affaticamento e lo stress lavorativo possono alterare le strategie di controllo biomeccanico per le estremità superiori (cioè collo, spalle, braccia e mani) e l'estensione lombare, nonché aumentare la variabilità dell'andatura e dell'oscillazione. Come ultima conseguenza, il fenomeno può indurre dolori muscolari nel lavoratore e persino infortuni sul lavoro.

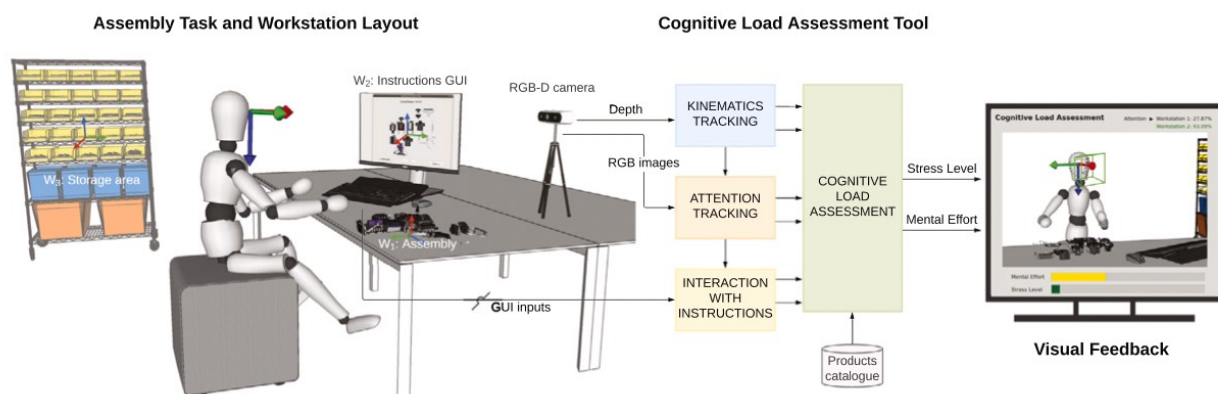


Fig. 5.1.1 Panoramica del sistema. A sinistra: illustrazione concettuale del layout della workstation, inclusi: fotocamera RGB-D, assemblaggio, interfaccia utente grafica (GUI) e area di archiviazione delle istruzioni. A destra: diagramma a blocchi del framework online proposto per valutare il carico cognitivo e fornire un feedback visivo all'utente. [8]

Lo strumento sviluppato calcola un elenco di indicatori associati a diversi aspetti di un'attività di assemblaggio e al layout di una postazione di lavoro nella produzione. Ogni fattore incide con un

peso su due indici definiti: lo sforzo mentale e il livello di stress psicologico. In base all'intervallo dei punteggi, determiniamo il livello di carico cognitivo che un individuo sta sperimentando all'interno della configurazione corrente. Lo studio utilizza esperimenti di assemblaggio per convalidare il metodo online rispetto ai metodi offline all'avanguardia nel campo delle scienze cognitive. (vedere la panoramica del sistema in Fig. 5.1.1) [8]

5.2 IL QUADRO DI VALUTAZIONE DEL CARICO COGNITIVO

La struttura complessiva del quadro di valutazione cognitiva proposto è rappresentata in Fig. 5.2.1. Questo metodo indaga (i) il livello di concentrazione di un lavoratore considerando la direzione dello sguardo e la posa della testa, (ii) il livello di stress, analizzando il linguaggio del corpo correlato all'attività (*ovvero occorrenze di self-touching e periodi di attività elevata*) e (iii) il costo delle informazioni e dell'identificazione delle parti, vale a dire lo sforzo cognitivo richiesto per utilizzare le istruzioni di assemblaggio e gestire gli strumenti e i componenti giusti per completare l'attività. Inoltre, sono inclusi parametri definiti a priori che riflettono le caratteristiche dell'attività di assemblaggio specifica e il layout della postazione di lavoro (ad esempio il numero di parti da assemblare e il livello di rumore). Combinando tutti questi fattori, si calcolano i punteggi finali dello sforzo mentale e del livello di stress. Questo ci permette di identificare un carico cognitivo eccessivo negli addetti all'assemblaggio. Inoltre, il framework include un'interfaccia di feedback visivo, attraverso la quale è possibile fornire messaggi di avviso intuitivi agli assemblatori. Per rendere il framework proposto facilmente implementabile sia in ambienti di laboratorio che industriali, la scelta dei sistemi sensoriali esterni è stata guidata dai costi di implementazione e dal comfort degli utenti (ad esempio evitando vincoli di indossabilità, rimozione ricorrente del dispositivo per caricarlo). Pertanto, abbiamo selezionato una famiglia di sistemi di imaging 3D disponibili a prezzi accessibili, vale a dire telecamere RGB-D, per rilevare gli operatori umani e quantificare il loro carico di lavoro. Le informazioni sulla profondità e le immagini RGB della telecamera vengono elaborate dal modulo "Kinematics Tracking" e dal modulo "Attention Tracking" per calcolare una serie di fattori di carico cognitivo. Questi due moduli operano in sinergia con il modulo "Interaction with the Instruction" e convergono nel modulo "Cognitive load Assessment" per calcolare i punteggi finali dello sforzo mentale e del livello di stress (vedi Fig. 5.2.1).

Prima di descrivere i moduli in dettaglio, forniamo la definizione del layout della postazione di lavoro. Un ambiente operativo può essere definito dalle postazioni interessate e dalla loro relativa configurazione. Consideriamo almeno tre tipi di workstation nelle attività di assemblaggio industriale: la workstation di assemblaggio $W1$, che è l'area occupata dai componenti di assemblaggio, la workstation di istruzioni $W2$, che fornisce le informazioni di assemblaggio e i

passaggi da seguire, ad es. un monitor e l'area di stoccaggio $W3$, dove sono conservati i componenti di assemblaggio (ad esempio viti, dadi e strumenti). In base al numero di postazioni, il sistema associa di conseguenza i frame di riferimento (vedi Fig. 5.1.1) nella posizione specificata durante una fase di configurazione. Le posizioni di questi quadri di riferimento rispetto alla testa dell'operatore sono utilizzate per determinare il livello di attenzione verso ogni postazione di lavoro (vedi Sezione 3.2).[8]

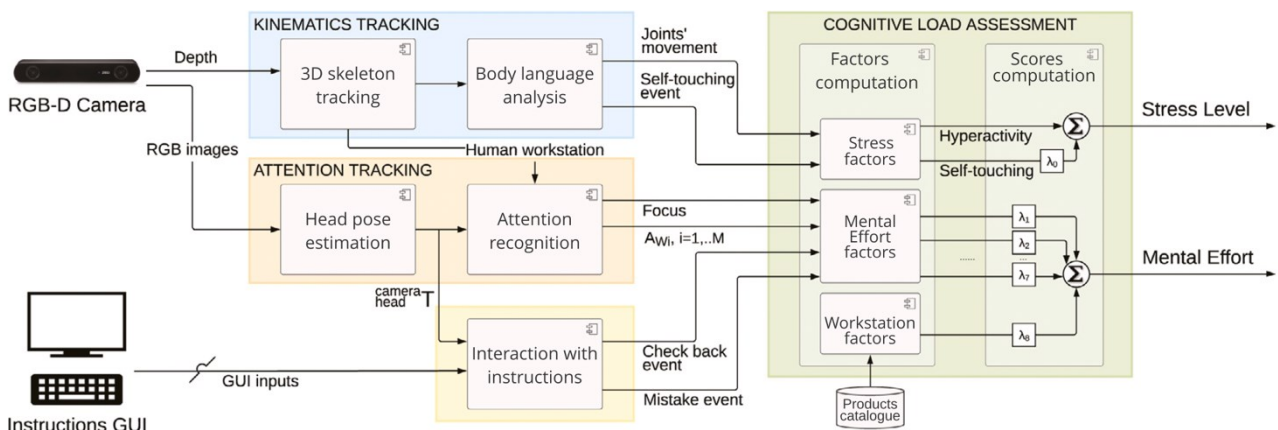


Fig. 5.2.1 Struttura generale del quadro di valutazione del carico cognitivo online. L'approccio proposto rileva i modelli nel movimento umano (blocco blu), indaga l'attenzione dei lavoratori (blocco arancione) e la loro interazione con le istruzioni di assemblaggio su un monitor (blocco giallo). Combinando tutti questi fattori, vengono calcolati i punteggi finali dello sforzo mentale e del livello di stress psicologico (blocco verde). (Per l'interpretazione dei riferimenti al colore nella legenda di questa figura, si rimanda il lettore alla versione web di questo articolo.) [8]

5.2.1 MODULO HUMAN UPPER-BODY KINEMATICS TRACKING

Il ruolo centrale di questo modulo è rilevare la presenza di un operatore umano che entra nell'area di lavoro e fornire informazioni al sistema sulle variazioni della sua configurazione cinematica corporea nel tempo. Viene sfruttato un algoritmo di tracciamento visivo dello scheletro, sviluppato da StereoLabs2 per tracciare lo scheletro umano dalle immagini di input di una *stereo camera*. L'algoritmo estrae la posizione 3D di venticinque punti chiave umani (ad esempio collo, spalle, gomiti, polsi, anche, ginocchia, caviglie) in tempo reale. Tra questi, selezioniamo quelli appartenenti alla parte superiore del corpo, e analizziamo i loro spostamenti per calcolare i fattori che descrivono il livello di stress dell'operatore (vedi Sezione 5.2.4).

Le informazioni spatio-temporali dei movimenti umani vengono utilizzate anche per distinguere tra possibili compiti eseguiti dall'operatore. Per fare ciò, viene continuamente calcolata la distanza sul piano orizzontale tra il punto chiave dello scheletro del "collo" e le postazioni di lavoro: si assume che il lavoratore svolga il compito associato alla postazione di lavoro a cui è più vicino. Ad esempio, supponiamo che l'assemblatore stia cercando uno strumento se accede all'area di stoccaggio. D'altra parte, i fattori di sforzo mentale vengono calcolati solo se il soggetto si trova all'interno di un intervallo predefinito rispetto alla postazione di montaggio o istruzione (es. $W1$ o $W2$).[8]

5.2.2 MODULO HUMAN ATTENTION TRACKING

Al giorno d'oggi, diversi sistemi sensoriali possono fornire misurazioni accurate del coinvolgimento e dell'attenzione umana. Tuttavia, questi sistemi comportano notevoli svantaggi come disagio (nella vestibilità dei sistemi) e limitata gamma di operabilità. Per questi motivi, in questo elaborato viene proposto un metodo visual-based, che è brevemente esemplificato in fig. 5.1.1.

Si sfrutta un Head tracker, per rilevare il volto umano e un modello di deep learning per identificare i punti di riferimento facciali, mentre per stimare la posa della testa viene sfruttato il modello Perspective-n-Point (PnP).

L'output della procedura è la posizione e l'orientamento della testa rispetto all'inquadratura della telecamera. Successivamente, osserviamo la trasformazione tra lo scheletro della testa e ogni postazione di lavoro definita nella fase di configurazione e il vettore cartesiano che esprime la loro posizione relativa è mappato in coordinate sferiche (cioè angolo azimutale θ , angolo di elevazione φ e distanza radiale).

Per stimare il livello di attenzione verso ogni postazione di lavoro, viene modellata una funzione di appartenenza logica fuzzy sugli angoli calcolati. Per ottenere il comportamento desiderato in diversi intervalli, definiamo la funzione come segue:

$$f(\alpha_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\alpha_i| \leq \alpha_{\min,i} \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{|\alpha_i| - \alpha_{\min,i}}{\alpha_{\max,i} - \alpha_{\min,i}} \pi \right) \right], & \text{if } \alpha_{\min,i} < |\alpha_i| \leq \alpha_{\max,i} \\ 0, & \text{if } |\alpha_i| > \alpha_{\max,i} \end{cases}$$

dove α_i è uno dei due angoli misurati (cioè azimut $\theta_i(t)$ o elevazione $\varphi_i(t)$) ad ogni istante t , permettendo la continua localizzazione della i esima postazione rispetto alla direzione dello sguardo del soggetto. La funzione fuzzy include i punti di controllo ($\alpha_{\min,i}, \alpha_{\max,i} > 0$) definiti a priori, che determinano i limiti superiore e inferiore indipendenti dell'area in cui la funzione ha un comportamento regolare. Pertanto, l'indicatore $f(\alpha_i)$ diminuisce esponenzialmente insieme alla crescita del valore assoluto dell'angolo al di sopra della soglia minima ($\alpha_{\min,i}$), prima di stabilizzarsi a una soglia massima ($\alpha_{\max,i}$). La valutazione del livello di attenzione (AW) i verso ogni i postazione di lavoro è quindi calcolata come prodotto tra gli indicatori di azimut $\theta_i(t)$ ed elevazione $\varphi_i(t)$ normalizzati:

$$A_{W_i}(\theta_i(t), \varphi_i(t)) = f(\theta_i(t)) * f(\varphi_i(t)).$$

Data l'attenzione stimata a tutte le postazioni di lavoro, possiamo valutare se il lavoratore è attualmente distratto o concentrato su una particolare postazione di lavoro. Questo viene determinato semplicemente controllando se almeno uno dei parametri di attenzione è al di sopra di una soglia predefinita. Se così fosse, scopriamo la postazione che il lavoratore sta guardando come quella in cui il parametro associato A è massimo.[8]

5.2.3 MODULO INSTRUCTION

In questo lavoro, assumiamo che le istruzioni di montaggio siano mostrate su un monitor attraverso un'interfaccia utente grafica (GUI), che consente all'operatore di sfogliarle (vedi Fig. 5.1.1). Gli input dalla tastiera consentono di guardare l'istruzione successiva, controllare di nuovo la stessa istruzione (cioè controllo dell'istruzione indietro) o tornare indietro nelle istruzioni. Di conseguenza, il modulo "interazione con le istruzioni" è incaricato di monitorare l'avanzamento del compito. In base ai comandi da tastiera registrati, fornisce al sistema il numero di passi della sequenza di assemblaggio che l'utente ha già completato, i check back delle istruzioni e l'occorrenza di un errore che obbliga l'utente a tornare su più di un'istruzione.[8]

5.2.4 MODULO PER LA STIMA DEL CARICO COGNITIVO

L'ultimo modulo sfrutta gli indicatori del carico di lavoro nel settore manifatturiero individuati da numerosi ricercatori esperti ed esperti industriali. In particolare, definiamo un elenco di fattori di carico cognitivo e li calcoliamo a partire dall'output dei moduli sopra descritti. Si noti che l'unità di analisi è a livello di posto di lavoro, includendo sia l'operatore che il layout delle postazioni di lavoro. Ogni fattore viene quindi moltiplicato per il peso assegnato λ (vedi Sezione 5.3) e una somma definita delle metriche ponderate determina i punteggi finali dello sforzo mentale e del livello di stress. Una descrizione dettagliata dei fattori di carico cognitivo e dei punteggi proposti è disponibile nella sezione successiva.[8]

5.3 DEFINIZIONE DEI FATTORI DI CARICO COGNITIVO

Sono stati definiti e sviluppati una serie di fattori di carico cognitivi che vengono calcolati per ciascun loop della pipeline del sistema e contribuiscono in modo specifico al livello di sforzo mentale e di stress. Inoltre, sono stati presentati i "fattori della postazione di lavoro", che possono influenzare il carico cognitivo totale nelle attività di assemblaggio. Questo studio crede che una combinazione di questi fattori possa fornire approfondimenti sul sistema cognitivo umano.[8]

5.3.1 SFORZO MENTALE

5.3.1.1 PERDITA DI CONCENTRAZIONE

Questo fattore analizza l'attenzione che un individuo presta ad un compito.

Viene valutata quindi la quantità di tempo non dedicata al montaggio, alle istruzioni o a qualsiasi altra mansione, e quindi viene quantificato per quanto tempo un individuo non è concentrato sul suo compito. Il fattore di perdita di concentrazione è quindi definito come:

$$\text{concentratio Loss } (t) = 1 - \sum_{w=1}^M \frac{[\text{attention time}]_w}{\text{time elapsed}},$$

dove M è il numero di postazioni definite in fase di configurazione.[8]

5.3.1.2 RITARDO DI APPRENDIMENTO

Questa metrica indaga la capacità di apprendere rapidamente una nuova regola dalle istruzioni e valuta l'automaticità dell'operatore nel completare l'assemblaggio. Ci siamo ispirati alla teoria del Rapid Instructed Task Learning, che analizza l'esecuzione efficiente dell'azione immediatamente dopo le istruzioni e senza pratica precedente. Gli studi evidenziano che le istruzioni possono persino produrre effetti automatici in compiti relativamente semplici.

Il presupposto qui è che più tempo il soggetto trascorre concentrandosi sui componenti dell'insieme, più lento è l'apprendimento. Quindi, possiamo dedurre che meno banale è il compito, maggiore è il carico cognitivo. Il fattore di ritardo di apprendimento è quindi definito come:

$$\text{Learning Delay } (t) = \frac{\text{dwell time on assembly}}{\text{time elapsed}},$$

dove "dwell time on assembly" è l'intervallo in cui il soggetto si concentra sulla postazione di montaggio $W1$. [8]

5.3.1.3 RICHIESTA DI CONCENTRAZIONE

L'incidenza stimata delle perdite di attenzione è solitamente associata al sovraccarico cognitivo. Questo fattore è definito come il numero di volte in cui il soggetto si distrae, perdendo l'attenzione verso tutte le postazioni coinvolte nell'attività.

In particolare, il parametro istantaneo valuta le transizioni alla non attenzione per istruzione, escludendo quelle per spostare il focus su un'altra postazione, quindi è definito come:

$$\text{Concentration Demand } (i_n) = \sum_{w=1}^M ([\text{losses of attention}]_w - [\text{switches to another workstation}]_w)$$

dove i_n rappresenta la n -esima istruzione e M è il numero della workstation.

Il parametro complessivo mantiene la memoria del carico che l'operatore subisce durante l'attività. Ogni volta che viene rilevato l'evento d (ovvero la perdita di attenzione da qualsiasi postazione di lavoro), registriamo l'istante in cui si verifica. Quindi, si considera il rapporto tra la somma delle istanze temporali e il tempo trascorso:

$$Concentration\ Loss(t) = \sum_{d=1}^D \frac{[instant\ of\ attention\ loss]_d}{time\ elapsed}$$

dove D è il numero totale di perdite di attenzione durante il lavoro sull'attività.[8]

5.3.1.4 COSTO D'ISTRUZIONE

Questa metrica esamina la qualità generale delle istruzioni utilizzate per raccogliere informazioni sul lavoro. Abbiamo contato i passaggi di attenzione tra la postazione di assemblaggio e il monitor, escludendo i controlli richiesti per una nuova istruzione. Il parametro istantaneo definisce il costo delle informazioni per istruzione, mentre il parametro complessivo considera invece i C istanti in cui si è verificato l'evento c (ovvero uno scambio non richiesto):

not required switches = instruction checks – instructions showed,

$$Instruction\ Cost(t) = \sum_{c=1}^C \frac{[instant\ of\ no\ required\ switch]_c}{time\ elapsed}$$

5.3.1.5 DIFFICOLTA' DEL COMPITO

Questo fattore stima lo sforzo cognitivo richiesto per eseguire un compito. Per fare ciò, il framework registra automaticamente i controlli didattici b sulla GUI. Poiché la richiesta del compito può variare in funzione del carico cognitivo, anche qui il parametro istantaneo è integrato con un parametro complessivo. Vengono definiti come segue:

Task Difficulty (i_n) = instruction check backs;

$$Task\ Difficulty(t) = \sum_{b=1}^B \frac{[instant\ of\ instruction\ check\ backs]_b}{time\ elapsed}$$

dove B è la quantità totale di controlli delle istruzioni eseguiti durante il compito.[8]

5.3.1.6 FRUSTAZIONE DOVUTA DAL FALLIMENTO

Questa è una semplice equazione che descrive il meccanismo attivato dopo aver commesso un errore e . Il parametro complessivo è calcolato come segue:

$$Frustration\ by\ Failure(t) = \sum_{e=1}^E \frac{[instant\ of\ mistake\ occurrence]_e}{time\ elapsed};$$

con E la quantità totale di errori commessi durante il compito. In questo caso, viene rilevato un errore nella sequenza di assemblaggio ogni volta che l'utente torna a più di un'istruzione.

Ricordiamo che, grazie al tracciamento dello scheletro, rileviamo in quale postazione si trova l'operatore. Si noti quindi che i fattori sopra descritti vengono calcolati solo se l'essere umano è in prossimità della postazione di lavoro $W1$ e rimangono costanti se l'operatore si allontana.[8]

5.3.1.7 IDENTIFICAZIONE DELLO STRUMENTO

Questo fattore valuta l'elaborazione mentale per identificare lo strumento necessario per il montaggio. Ogni volta che si accede all'area di stoccaggio (ovvero l'essere umano è in prossimità della postazione di lavoro $W3$), il fattore di identificazione dello strumento viene calcolato come il tempo impiegato per cercare lo strumento giusto in decimi di secondo.[8]

5.3.2 LIVELLO DI STRESS

L'analisi del linguaggio del corpo sta guadagnando un crescente interesse nel campo emergente della rilevazione automatica dello stress. Di conseguenza, vengono definite le funzionalità relative all'attività esclusivamente sulla base delle informazioni visive e del tracciamento dello scheletro derivato.

- $Self - touching(t) = \sum_{s=1}^S \frac{[instant\ of\ self-touching]_s + 60 - t}{60}$,
- *Hyperactivity*

5.3.3 POSTAZIONE DI LAVORO

L'operatore può navigare nell'elenco dei prodotti e combinare diversi oggetti in sequenze per gestire assieme più complessi. Viene caricata la sequenza di oggetti da assemblare e vengono valutati i seguenti parametri per l'attività selezionata:

- *number of assembly components,*
- *number of tools used,*
- *physical effort,*
- *variant flora,*
- *level of noise.*

5.3.4 STIMA DEI PUNTEGGI DI CARICO COGNITIVO

I fattori di carico cognitivo descritti nelle sezioni precedenti sono calcolati online, sullo sfondo delle normali attività dei lavoratori. Questo per identificare al volo un carico cognitivo eccessivo e inviare messaggi di avviso all'addetto all'assemblaggio. A questo scopo, moltiplichiamo ogni fattore per un peso (vedi Sezione 5.3): la somma dei fattori di sforzo mentale ponderato e livello di stress risulta rispettivamente nei due omonimi punteggi di "livello superiore".

Lo sforzo mentale è calcolato a due diversi livelli. La sua dinamica viene stimata online sfruttando i parametri istantanei e fornita come feedback attraverso uno schermo dedicato. Per l'analisi post hoc, selezioniamo invece i fattori complessivi poiché, in questa fase, non miriamo a valutare il carico cognitivo innescato da uno stimolo ma lo sforzo mentale complessivo indotto dall'intero compito e confrontiamo il suo andamento tra diversi test e condizioni.[8]

5.4 ANALISI SPERIMENTALE

In questa sezione viene utilizzata una simulazione per valutare le prestazioni e le potenzialità dell'approccio proposto.[8]

5.4.1 SET-UP

Per l'esperimento, è stato riprodotto un possibile ambiente operativo (vedi Fig. 5.4.1.1).

Ai partecipanti è stato chiesto di sedersi a una scrivania e sul tavolo è stato posizionato un kit di assemblaggio stampato in 3D (che definisce la postazione di lavoro *W1*). Le istruzioni per assemblare l'oggetto sono state mostrate su un monitor (workstation *W2*) e consistevano in brevi video completi di circa 20s ciascuno. Infine, piccole scatole con viti, bulloni, dadi e strumenti necessari sono state posizionate nell'area proprio dietro la postazione di lavoro di definizione del partecipante *W3*.

Una stereo-camera ha monitorato frontalmente il partecipante per l'intera durata dell'esperimento.

Gli esperimenti miravano a testare in modo incrociato le prestazioni del carico cognitivo rispetto alle misurazioni fisiologiche. In particolare, è stato analizzato l'andamento dello sforzo mentale in relazione alla variabilità della frequenza cardiaca, mentre il livello di stress è stato confrontato con le caratteristiche comunemente utilizzate nella risposta galvanica cutanea. La sezione seguente giustifica la scelta di parametri specifici come ground truth e descrive i sensori adottati (evidenziati anche in Fig. 5.2.1) e la post-elaborazione dei segnali acquisiti.

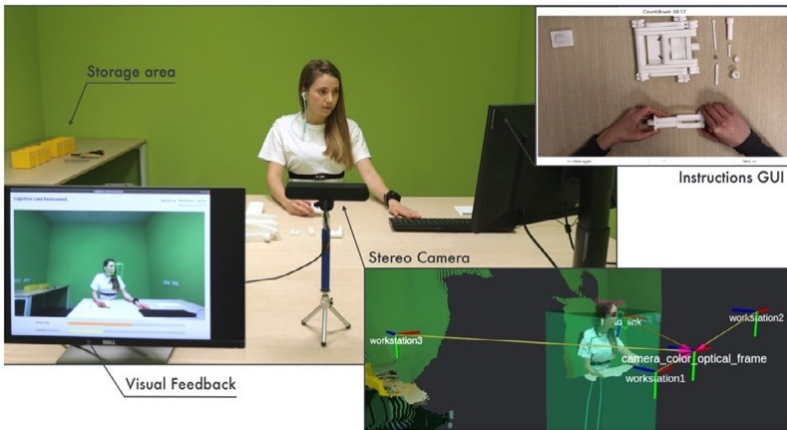


Fig. 5.4.1.1 Panoramica della configurazione sperimentale evidenziando: telecamera stereo zed2, GUI delle istruzioni (monitor e tastiera), area di archiviazione e schermo che fornisce un feedback visivo. L'assieme 3D viene posizionato sul tavolo di fronte al soggetto.[8]

5.4.2 RISPOSTA HRV/RISPOSTE CUTANEE GALVANICHE

Per registrare il segnale dell'elettrocardiogramma (ECG) è stata utilizzata una fascia toracica. L'analisi dei dati cardiovascolari è stata successivamente eseguita utilizzando un software che calcola diverse metriche classiche in termini di tempo, frequenza e dominio non lineare.

La conduttanza cutanea è stata monitorata dal braccialetto Empatica E4,10, un dispositivo indossabile di livello medico che acquisisce dati fisiologici in tempo reale. Il segnale GSR registrato è stato quindi elaborato utilizzando il toolbox MATLAB open source.[8]

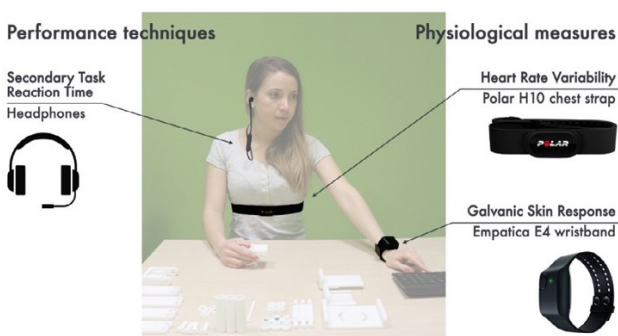


Fig. 5.4.2.1 Misurazioni e sensori utilizzati.[8]

5.4.3 COMPITO SECONDARIO

In concomitanza con il compito di assemblaggio primario, ai partecipanti sono state poste alcune domande (tre per condizione sperimentale) attraverso le cuffie. Nella metodologia basata sui compiti, si suppone che le prestazioni su un compito secondario riflettano il livello del carico cognitivo imposto dal compito primario.[8]

5.4.4 QUESTIONARIO SOGGETTIVO

Alla fine dell'esperimento, è stato chiesto ai partecipanti di compilare il questionario NASA-TLX. La valutazione include una tecnica sviluppata dalla NASA per valutare l'importanza relativa dei fattori nel determinare il carico di lavoro sperimentato. Dallo schema delle scelte, siamo in grado di associare un peso a ciascun fattore di carico cognitivo e calcolare il punteggio complessivo coerente con l'esperienza di un determinato soggetto. Una copia del questionario personalizzato può essere trovata come materiale supplementare al link: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0736584522000679-mmcl.zip>

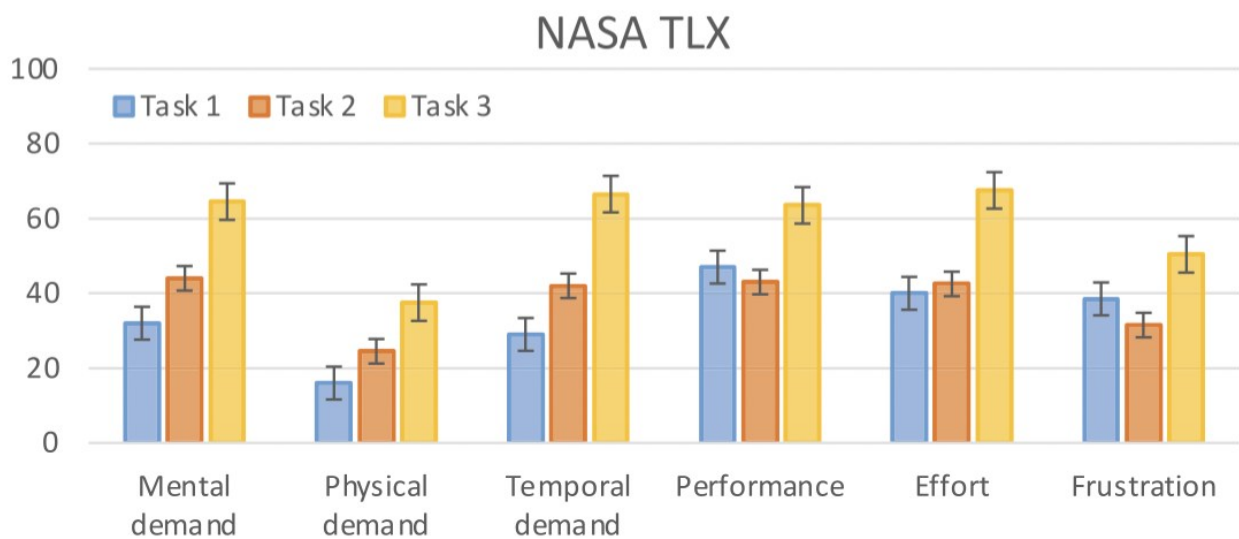


Fig. 5.4.4.1 Risultati del questionario NASA-TLX. [8]

5.4.5 PROTOCOLLO DELL'ESPERIMENTO

Il carico cognitivo impiegato da un lavoratore è fortemente suscettibile alle competenze del singolo valutatore. Pertanto, è stato preso in considerazione il personale senza precedente competenza ed esperienza nell'attività di assemblaggio presentata.

Lo studio ha utilizzato un disegno sperimentale all'interno dei soggetti in cui ogni partecipante è stato sottoposto a tutte e tre le condizioni sperimentali. I compiti sono stati ideati con tre livelli di complessità (cioè compito 1 - semplice, compito 2 - medio e compito 3 - difficile). L'ordine dei

compiti è stato definito come 1–2–3 per tutti i soggetti, con l'obiettivo di imporre una crescente complessità e quindi identificare un aumento dello sforzo cognitivo. I partecipanti hanno avuto quindici minuti per completare ogni sezione. [8]

5.5 VALUTAZIONE DEL CARICO COGNITIVO

La figura 5.5.1 mostra i fattori di sforzo mentale nel tempo per un soggetto, come esempio. Segnaliamo i fattori di perdita di concentrazione, ritardo nell'apprendimento, costo dell'istruzione e difficoltà del compito poiché mostrano una tendenza significativa durante l'esecuzione del compito. I risultati delle attività 1, 2 e 3 sono riportati sullo stesso grafico per evidenziare le differenze nelle tendenze. Si noti che il partecipante ha completato la prima e la seconda attività prima del tempo totale disponibile (ovvero quindici minuti). I fattori vengono normalizzati online, quando necessario, secondo soglie definite nella prima sessione sperimentale.

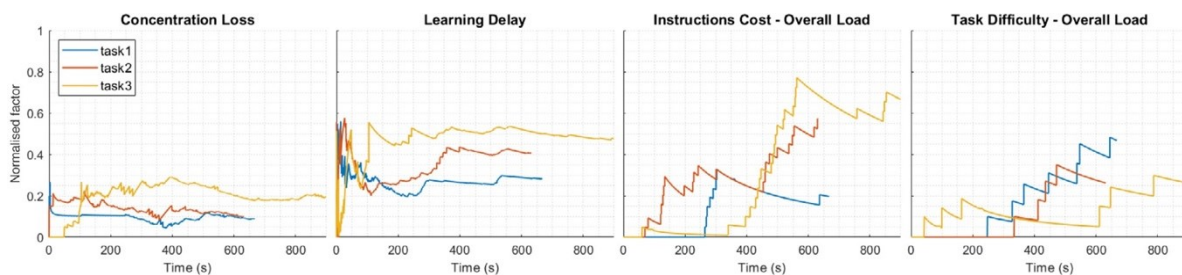


Fig. 5.5.1 Fattori di perdita di concentrazione, ritardo nell'apprendimento, costo delle istruzioni e difficoltà del compito associati al soggetto 1 durante tre condizioni sperimentali. [8]

I risultati ottenuti dalla combinazione ponderata dei fattori sono presentati in Fig. 5.4.6.2. In particolare, la linea nera riporta l'andamento del punteggio dello sforzo mentale nel tempo nelle diverse condizioni sperimentali. Le barre colorate evidenziano invece la media del punteggio a intervalli di tre minuti. [8]

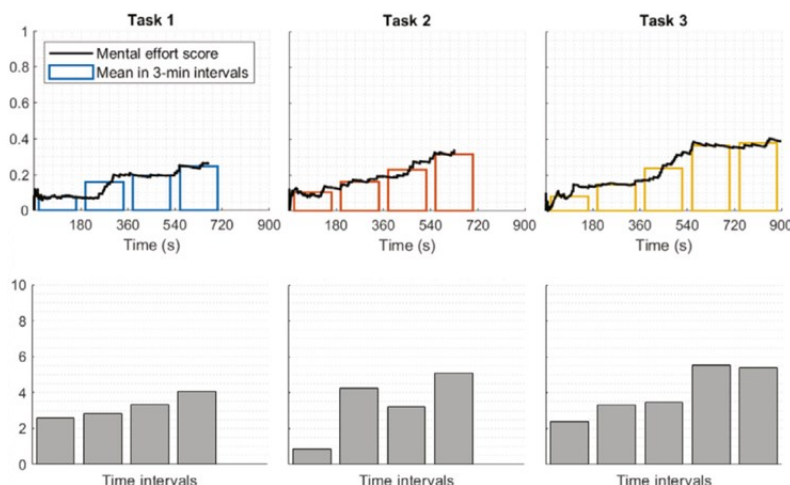


Fig. 5.4.6.2 Confronto tra il punteggio dello sforzo mentale calcolato online dal framework presentato e il rapporto LF/HF estratto offline da blocchi di tre minuti di segnale elettrocardiografico per il soggetto 1. [8]

5.6 FEEDBACK VISIVO ONLINE

I punteggi del carico cognitivo vengono calcolati online poiché l'obiettivo finale è identificare l'eccessivo carico cognitivo e fornire messaggi di avviso all'operatore umano. È stata progettata e implementata un'interfaccia per fornire un feedback visivo sul carico di lavoro che il lavoratore sta attualmente affrontando durante l'attività di assemblaggio (vedere Fig. 5.6.1) quest'ultimo è rappresentato da barre codificate a colori, una per lo sforzo mentale e una per il livello di stress. Il colore viene utilizzato qui per avvisare quando viene identificato un carico cognitivo eccessivo (verde - carico cognitivo basso, giallo - carico cognitivo medio, arancione - carico cognitivo alto e rosso - carico cognitivo molto alto). Si può comprendere meglio il funzionamento del feedback visivo implementato guardando il video fornito come materiale supplementare al link: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0736584522000679-mmcl.zip> [8]

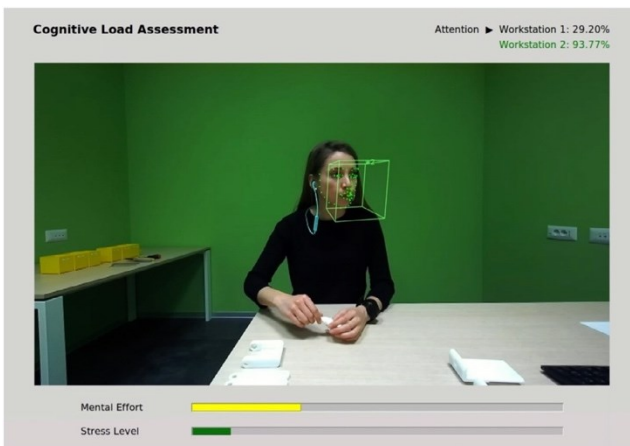


Fig. 5.6.1 Segnalazione del feedback visivo online. [8]

5.7 COMMENTO E CONCLUSIONI

Questo documento ha presentato un metodo online e quantitativo per monitorare il carico cognitivo degli operatori umani analizzando la distribuzione dell'attenzione e rilevando modelli di movimento nelle attività di assemblaggio direttamente dalle immagini di input di una stereo-camera. L'obiettivo principale era identificare i rischi nelle attività e nella progettazione delle postazioni di lavoro, in cui un carico di lavoro eccessivo potrebbe portare a errori o difficoltà di lavoro.

I risultati hanno fornito le prime prove sulla capacità del metodo di fornire approfondimenti significativi e affidabili sul carico cognitivo al lavoro. I punti di forza pratici della configurazione includono il costo ridotto dei componenti del sistema e il comfort degli utenti durante l'esecuzione dei loro compiti. Questo metodo di valutazione del carico cognitivo non richiede al lavoratore di indossare alcun sensore e può essere facilmente configurato e utilizzato da non esperti nelle aree dell'ergonomia cognitiva e dell'interazione uomo-computer.

Inoltre, il sistema è in grado di identificare periodi di carico di lavoro eccessivo in tempo reale nelle attività di assemblaggio e fornire messaggi di avviso intuitivi su uno schermo, utilizzando barre codificate a colori, di sforzo mentale e livello di stress sperimentato dal lavoratore.

Il metodo proposto mostra caratteristiche promettenti da applicare al settore manifatturiero. Il limite principale è l'ipotesi di un ambiente di lavoro ben strutturato, dove le istruzioni di montaggio vengono visualizzate su un monitor. Una progressione naturale di questa ricerca è quella di generalizzare il quadro, includendo più postazioni di lavoro ed esaminare complicate operazioni industriali con più lavoratori, potenzialmente anche indossando dispositivi di protezione individuale.

I risultati finali suggeriscono che il metodo presentato ha il potenziale per essere integrato nello sviluppo di sistemi di interazione uomo-robot per migliorare l'ergonomia cognitiva umana negli ambienti industriali.[8]

6. METODO CLAM

Lo scopo del metodo CLAM consiste nel valutare il carico di lavoro cognitivo dell'operatore nello svolgimento di un compito di produzione [10]. Il metodo CLAM analizza la progettazione della postazione di lavoro per ridurre il carico di lavoro cognitivo. È sviluppato per valutare rapidamente il carico di lavoro cognitivo connesso alle attività e alla postazione di lavoro progettata. Un ingegnere, ad esempio, lavorando alla progettazione di nuove postazioni di lavoro e alla valutazione di quelle esistenti, potrebbe utilizzare lo strumento come guida analitica per ridurre gli sforzi cognitivi richiesti dal lavoratore per svolgere un compito in modo efficiente passando attraverso i fattori della valutazione (vedi sezione 6.1 e 6.2).

Il metodo CLAM può essere applicato adottando uno strumento online gratuito (<http://www.clam.se/tool.html>).

Il metodo CLAM si basa su undici fattori di valutazione, tutti utilizzando la terminologia comune dell'industria manifatturiera. Tutti i fattori sono valutati su una scala da 0 a 8, dove la valutazione più alta indica un compito cognitivamente più impegnativo (fig. 6.1). [10]

INTERVAL	ASSESSMENT
6-8	High cognitive workload
4-6	Moderate cognitive workload
2-4	Low cognitive workload
0-2	Very low cognitive workload

Fig. 6.1 Punteggi per i livelli del carico di lavoro cognitivo nel metodo CLAM. [4]

6.1 FATTORI BASATI SULLE ATTIVITA'

- **SATURAZIONE (0.17)**: indica quanto del tempo disponibile è occupato dalle attività lavorative. È misurato dalla percentuale del tempo occupato pianificato.
- **VARIAZIONE FLORA (0.11)**: stima il livello di variazione del prodotto su una postazione di lavoro. Si misura dalla percentuale degli stessi prodotti considerando tutte le varianti disponibili.
- **LIVELLO DI DIFFICOLTA' (0.07)**: stima lo sforzo fisico e cognitivo per eseguire un compito. È misurato da una prospettiva soggettiva.
- **CONSAPEVOLEZZA DELLA PRODUZIONE (0.07)**: indica quanta attenzione richiede l'attività. È misurato da una prospettiva soggettiva.
- **DIFFICOLTA' DI UTILIZZO DEGLI STRUMENTI (0.02)**: si riferisce al tipo di strumenti utilizzati con la loro complessità soggettiva. È misurato da una prospettiva soggettiva. [10]

6.2 FATTORI BASATI SULLA POSTAZIONE DI LAVORO

- NUMERO DI UTENSILI UTILIZZATI (0.01): indica il numero di strumenti utilizzati.
- MAPPATURA POSTAZIONE DI LAVORO (0.13): indica la corrispondenza tra il layout della postazione e la sequenza di montaggio. È misurato da una prospettiva soggettiva.
- IDENTIFICAZIONE DELLE PARTI (0.11): indica la presenza o l'assenza di parti alternative per l'assemblaggio del prodotto finito.
- COSTO DELL'INFORMAZIONE (0.12): indica lo sforzo fisico o cognitivo richiesto per identificare l'informazione, ad es. se le informazioni sono facilmente accessibili o no. Viene misurato da una prospettiva soggettiva.
- QUALITA' DELL'ISTRUZIONE (0.11): indica la qualità delle istruzioni fornite al lavoratore per svolgere il compito. È misurato da una prospettiva soggettiva.
- POKE-A-YOKE (0.07): indica la presenza o l'assenza di soluzioni poke-a-yoke o altri tipi di vincoli. È misurato da una prospettiva soggettiva.[10]

6.3 METODOLOGIA DEL MODELLO

La versione del metodo CLAM che viene riportata in questo documento è stata pensata per veloci valutazioni del carico cognitivo connesso ad una postazione di lavoro e ad un compito.

Il risultato della valutazione implica quanto sforzo cognitivo è previsto per l'operatore secondo l'assetto attuale. Lo strumento di valutazione fattoriale, nella versione iniziale, consiste in diversi fogli di valutazione basati su Excel (uno per ciascun fattore, vedi fig. 6.3.1) e una pagina dei risultati, in cui veniva calcolato il carico totale e con una legenda molto grezza per la quantità di carico a cui erano associati i diversi punteggi (vedi fig. 6.1). [10]

Quando tutti i fattori sono stati analizzati ed è stato scelto un livello per ciascuno di essi, il valutatore è passato alla pagina dei risultati e gli sono stati mostrati i dati raccolti e un consolidamento dei fattori secondo i pesi discussi in precedenza (Fig. 4).

Recentemente si è utilizzato il metodo CLAM in un progetto di test misto che include approcci quantitativi e qualitativi. La ragione di questo progetto di test misto era ottenere credibilità e rigore scientifico attraverso diversi tipi di approcci di triangolazione ^[13]. In questo progetto di valutazione vengono triangolati diversi approcci metodologici, ad esempio: visite sul campo ^[14], ispezioni di applicabilità ^[12] o valutazioni soggettive del carico di lavoro mentale attraverso NASA-TLX. Si è anche eseguita la triangolazione dei dati su ad esempio: misurazioni soggettive, dati di produzione quantitativi, interviste, "pensa ad alta voce" e registrazioni video. Questo ha portato ad aumentare,

l'accuratezza, la credibilità e il rigore scientifico dei risultati che hanno consentito agli sviluppatori di testare la coerenza di dati raccolti dai diversi approcci durante il test del metodo.

Il metodo CLAM è composto da due parti; lo strumento di valutazione fattoriale e lo strumento manuale.

Le istruzioni per la valutazione vengono fornite tramite un oggetto di menù separato chiamato "Istruzioni" in cui è possibile trovare il manuale CLAM completo, oppure facendo clic sulle intestazioni dei fattori, che rivela una descrizione più breve del fattore selezionato. La valutazione viene quindi effettuata attraverso una selezione di elenchi. Dopo che tutti i fattori sono stati valutati, il sistema calcola i risultati in base all'input e alla ponderazione predefinita fornita e presenta il punteggio finale della valutazione. [11]

Variant flora

Description The variant flora is relevant to manufacturing organizations running a mixed mode assembly flow. A flow where volume and variant products are assembled intermixed and not according to a batching strategy.

Measurement: Percentage

How to evaluate (method) Assessment of what percentage of daily output is made up of volume products

Estimated current level

4

Level	Description
L4	65% or fewer volume products
L3	65-75% volume products
L2	75-90% volume products
L1	90% or more volume products

Fig. 6.3.1 Una delle pagine usate per la valutazione dei fattori. [11]

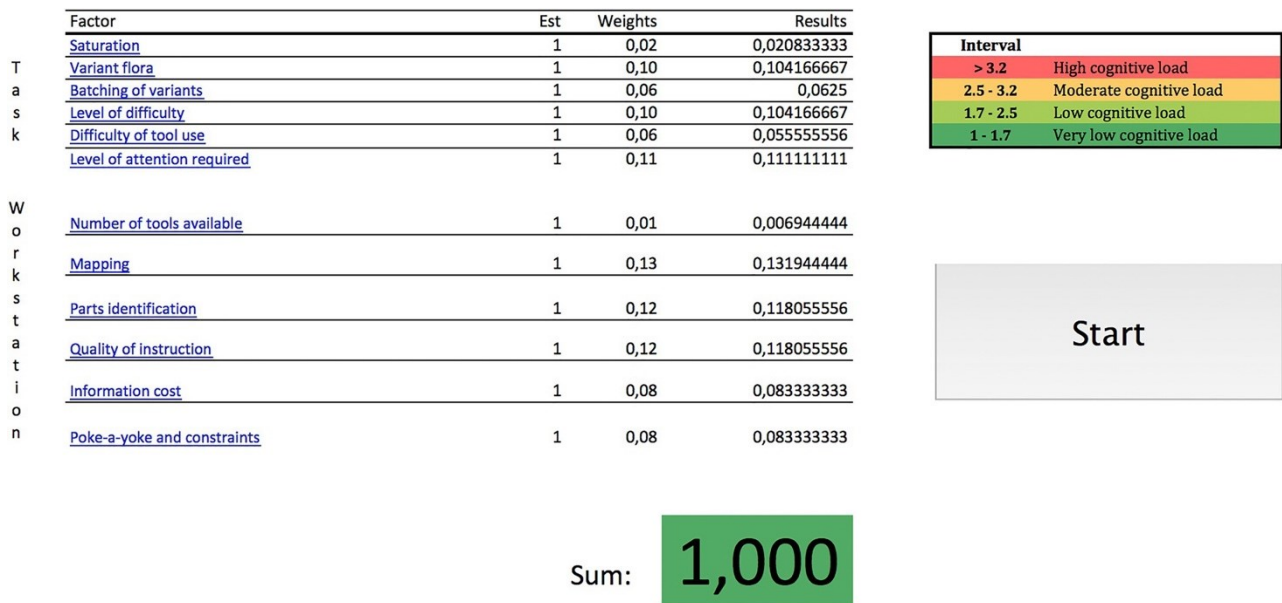


Fig.6.3.2 La pagina dei risultati dello strumento di valutazione fattoriale. [11]

6.4 COMMENTO E CONCLUSIONI

Come già anticipato nei precedenti capitoli il crescente utilizzo di dispositivi innovativi nel contesto industriale sta portando a cambiamenti nelle mansioni svolte dagli operatori in particolare sta favorendo l'aumento dei compiti cognitivi e la riduzione dei compiti fisici, sempre più affidati a dispositivi innovativi.

Nel presente lavoro di ricerca si propone un modello che consenta di minimizzare il rischio ergonomico cognitivo degli operatori coinvolti in una catena di montaggio ampliando l'unità di analisi includendo l'intera postazione di lavoro, che è stata influenzata dalle più contemporanee teorie della cognizione, in cui l'ambiente funziona come una risorsa o un'impalcatura per le capacità cognitive umane. Il rischio e la sua accettabilità in questo documento sono valutati utilizzando principalmente il metodo CLAM inserito in un test misto con altri metodi di valutazione in modo da ottenere dei risultati più precisi possibili.

Tuttavia, il lavoro di ricerca richiede ulteriori indagini per valutare l'affidabilità del modello in casi industriali più complessi. Il modello proposto fornisce a chi stipula le programmazioni del lavoro un programma "preliminare" adottando una strategia organizzativa sostenibile dal punto di vista economico. A questo proposito, un presupposto importante del modello consiste nell'adattabilità dei lavoratori a svolgere tutte le attività di assemblaggio su tutte le postazioni di lavoro. [4]

Uno dei criteri più importanti per qualsiasi metodo HCI (che può essere generalizzabile a qualsiasi metodo) è se offra o meno intuizioni che aiuteranno a migliorare la situazione. Come evidenziato da Blandford e Green^[15] "Non importa quanto sia valido, affidabile o produttivo un metodo: applicarlo

si traduce in un sistema migliore?” Nel caso del metodo CLAM, l'attenzione si è concentrata piuttosto sui temi orientati all'operatore e i temi scientifici sono ancora presenti ma non pienamente considerati. Come hanno dimostrato i test del metodo analitico CLAM, ha un grande potenziale per migliorare la progettazione della postazione di lavoro e ridurre il carico cognitivo per gli addetti all'assemblaggio. In altre parole, si può concludere che sia utilizzabile e utile, e il passo successivo è vedere fino a che punto potrà essere utilizzato nella pratica nel settore manifatturiero.[11]

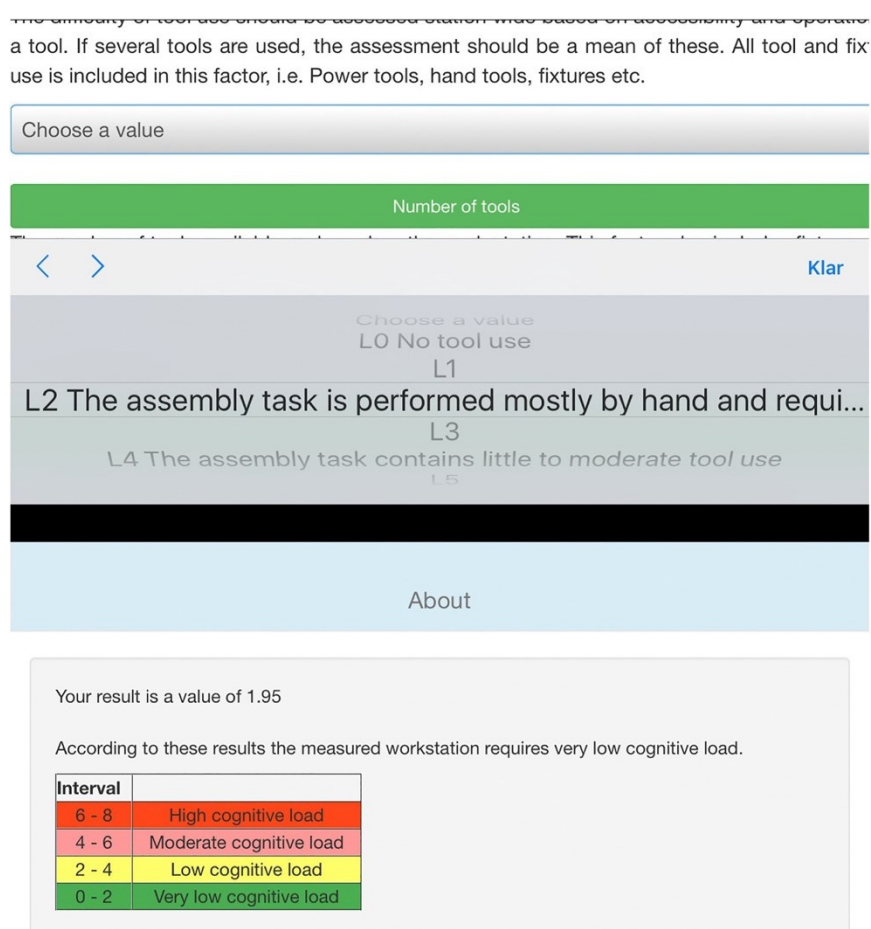


Fig. 6.4.1 Screenshot di uno smartphone raffigurante la prima versione ufficiale del CLAM method-in-tool; la valutazione fattoriale con il menù di selezione (sopra) e la pagina dei risultati della valutazione (sotto). [11]

7. CONCLUSIONI

Con l'affermarsi dell'industria 4.0 e lo sviluppo di nuove tecnologie che mettono gli operatori manifatturieri nella condizione di interfacciarsi sempre più con strumenti digitali, l'affaticamento mentale e cognitivo degli operatori è diventato un argomento molto importante per quanto riguarda la progettazione di nuovi impianti. L'obiettivo di questo elaborato è quello di riportare i principali metodi per la valutazione dell'affaticamento cognitivo di un operatore mentre svolge dei compiti di assemblaggio in una linea di produzione.

Il metodo COLET basato sul tracciamento oculare si è dimostrato un buono strumento di misurazione che è stato in grado di individuare quattro diverse fasce di affaticamento, dimostrando l'effetto di un secondo compito e la pressione di una tempistica ridotta, sui valori di affaticamento cognitivo dell'operatore. I valori misurati che si sono dimostrati statisticamente più significativi sono stati la frequenza di fissazione e diametro della pupilla.

Allo stesso tempo però si deve tener conto di alcune lacune mostrate da questo metodo. La durata delle prove effettuate non è paragonabile alla durata di un turno di lavoro e le situazioni nella vita reale, al di fuori di un ambiente di laboratorio, possono essere influenzare negativamente determinate misurazioni a causa della presenza di fattori come rumore, movimenti del corpo e la luce variabile. I risultati ottenuti dal metodo COLET dimostrano quindi il potenziale dell'utilizzo degli eye-tracker per individuare i vari livelli di CW, rafforzando allo stesso tempo la necessità di ricerche future.

I punti di forza del metodo Vision-Based includono la praticità della configurazione, il costo ridotto dei componenti del sistema e il comfort degli utenti durante l'esecuzione dei loro compiti in quanto, contrariamente al metodo basato sull'Eye tracker, la valutazione non richiede al lavoratore di indossare alcun sensore e può essere facilmente configurato e utilizzato da non esperti nelle aree dell'ergonomia cognitiva e dell'interazione uomo-computer.

Un progresso significativo portato da questo sistema negli ambienti di lavoro è la possibilità da parte dell'operatore di visualizzare tramite barre colorate il livello di affaticamento mentale e il livello di stress direttamente dal suo monitor, potendo quindi ricevere suggerimenti su quando si sia raggiunto un eccessivo affaticamento che non permette più una resa ottimale.

Il limite principale è l'ipotesi di un ambiente di lavoro ben strutturato, dove le istruzioni di montaggio vengono visualizzate su un monitor. Inoltre, in alcuni casi i dispositivi di protezione individuale potrebbero limitare l'individuazione degli schemi comportamentali utilizzati per la valutazione dell'affaticamento.

Riguardo il metodo CLAM utilizzato in un sistema per minimizzare il rischio ergonomico cognitivo degli operatori coinvolti in una catena di montaggio, il lavoro di ricerca richiede ulteriori indagini per valutare l'affidabilità del modello in casi industriali più complessi. Una condizione fondamentale per

l'utilizzo di questo sistema è l'adattabilità dei lavoratori a svolgere tutte le attività su tutte le postazioni di lavoro.

Nel complesso tutti i metodi analizzati sono in uno stadio avanzato di ricerca, con già test significativi effettuati, lo scoglio principale rimane la flessibilità e la capacità di questi metodi di adattarsi alle varie condizioni di lavoro in cui verranno utilizzati.

In tabella 7.1 è possibile rivedere velocemente le principali caratteristiche dei metodi presentati in questo elaborato. [1][4][8][10][11]

METODO	CARATTERISTICHE	PROBLEMATICHE
COLET (EYE-TRACKING)	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi di molti parametri associati allo studio pupillare, movimenti oculari e battito di ciglia attraverso un tracciatore oculare; • permette una valutazione più obiettiva del carico cognitivo subito; • insensibilità ai movimenti degli arti e della testa; • l'attrezzatura richiesta non richiede grandi capacità per l'impostazione. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambiamenti nella quantità di luce o spostare il focus da un oggetto lontano a uno vicino possono indurre ad errori nella valutazione del carico di lavoro.
VISION-BASED	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi condotta attraverso una valutazione della posizione della testa e il monitoraggio dello scheletro attraverso una stereo camera; • fornisce una valutazione immediata del carico mentale subito; • valuta l'affaticamento mentale valutando il controllo biomeccanico delle estremità superiori (limitando l'influenza di fattori esterni, es. luce); • costo ridotto dei componenti del sistema e comfort degli utenti che non devono indossare nessun sensore. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esperimento condotto eseguendo operazioni elementari (quanto influiscono i dispositivi di protezione individuale?); • necessario un ambiente di lavoro strutturato in modo da permettere alle istruzioni di montaggio di essere visualizzate su un monitor.

<p style="text-align: center;">CLAM</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Veloce valutazione del carico cognitivo che integra l'assetto della postazione e la difficoltà del compito; • associato ad altri metodi di valutazione ha fornito valutazioni affidabili. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'affidabilità del modello non è stata ancora testata in realtà industriali più complesse.
---	--	--

Tab. 7.1

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Coral, Melissa Patricia. M.S.I.H.E., Department of Biomedical, Industrial and Human Factors Engineering, Wright State University (2016). Analyzing Cognitive Workload Through Eye-Related Measurements: *A Meta-Analysis*.
- [2] Emmanouil Ktistakisa, Vasileios Skaramagkasa, Dimitris Manousosa, Nikolaos S. Tachosc, Evanthia Tripolitid, Dimitrios I. Fotiadisc, Manolis Tsiknakis (2022). COLET: A dataset for COgnitive workLoad estimation based on eye-tracking. *Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 224*.
- [3] Alex Cao, Keshav K. Chintamani, Abhilash K. Pandya, R. Darin Ellis (2009). *Behavior Research Methods*. NASA TLX: Software for assessing subjective mental workload 41 (1), 113-117.
- [4] Cavallo D., Boenzi F., Facchini F., Mossa G.. A model for balancing the cognitive ergonomic risk of operators in assembly lines. *Unconventional Plants*.
- [5] Sharon Claxton Bommer, Mary Fendley, A theoretical framework for evaluating mental workload resources in human systems design for manufacturing operations, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 63, 2018, Pages 7-17.
- [6] Adriana Ventura Carvalho, Amal Chouchene , Tânia M. Lima, Fernando Charrua-Santos (2020). Cognitive Manufacturing in Industry 4.0 toward Cognitive Load Reduction: A Conceptual Framework.
- [7] De Rivecourt, M., Kuperus, M., Post, W., & Mulder, L. (2008). Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics*, 51(9), 1295-1319
- [8] Marta Lagomarsino, Marta Lorenzini, Elena De Momi, Arash Ajoudani, An Online Framework for Cognitive Load Assessment in Industrial Tasks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 78, 2022.
- [9] Christine Fogarty, John A. Stern, Eye movements and blinks: their relationship to higher cognitive processes, *International Journal of Psychophysiology*, Volume 8, Issue 1, 1989, Pages 35-42.

- [10] Fred Paas, Alexander Renkl & John Sweller (2003) Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments, *Educational Psychologist*, 38:1, 1-4
- [11] Peter Thorvald, Jessica Lindblom, Rebecca Andreasson, On the development of a method for cognitive load assessment in manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 59, 2019, Pages 252-266, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.012>.
- [12] Jakob Nielsen. 1994. Usability inspection methods. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems (CHI '94)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 413–414. <https://doi.org/10.1145/259963.260531>
- [13] Patton, Michael Quinn. *Qualitative research. Encyclopedia of statistics in behavioral science*, 2005.
- [14] E. Goodman, M. Kuniavsky, A. Moed, Observing the user experience: a practitioner's guide to user research, *professional communication*, *IEEE Trans.* 56 (2013) 260-261.
- [15] A. Blandford, T.R. Green, *Methodological development*, in: C. P, C.A. L. (Ed.), *Research Methods for Human-Computer Interaction*, Cambridge University Press, New York, 2008, pp. 158–174.