



**Politecnico  
di Torino**

Politecnico di Torino

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

Sessione di Laurea Luglio 2024

**Human-robot collaboration in  
ambito manifatturiero:  
studio esplorativo di sensori per la  
valutazione del carico cognitivo**

Relatore:

Prof. Fiorenzo Franceschini

Candidato:

Maria Rea

Co-relatore:

Dott. Mirco Bartolomei

Anno Accademico 2023/2024

*A mio padre.  
A mia madre.  
A mia sorella.  
Siete per me la misura di tutte le cose.*

# INDICE

1. EVOLUZIONE DELL'INDUSTRIA 4.0: DA TECHNOLOGY-FOCUSED A VALUE-DRIVEN .....	14
2. I COBOT E I PROCESSI COLLABORATIVI.....	17
2.1. Definizione e concetti chiave sui robot collaborativi.....	17
2.1.1. Cenni storici.....	19
2.2. <i>Human-robot collaboration</i> (HRC).....	20
2.2.1. Il concetto di collaborazione.....	20
2.2.2. La collaborazione human – robot .....	21
2.3. Assemblaggio manuale.....	28
3. ASSISTENZA ALL'OPERATORE TRAMITE ISTRUZIONI.....	32
4. IL CONCETTO DI CARICO COGNITIVO (o <i>cognitive workload</i> ) .....	34
4.1. Metodi per l'analisi del carico cognitivo .....	35
5. REALTÀ AUMENTATA.....	37
5.1. Definizione e concetti chiave .....	37
5.2. Panoramica sui <i>Visual Display AR</i> .....	39
5.2.1. Video see-through (VST).....	39
5.2.2. Optical see-through (OST) .....	41
5.2.3. Display proiettivo .....	42
5.3. Posizionamento dei display AR.....	42
5.4. AR e assemblaggio .....	43
5.4.1. Istruzioni con AR.....	45
6. PROVE SPERIMENTALI: ASSEMBLAGGIO DI UNO SKATEBOARD.....	47
6.1. Campione di partecipanti.....	47
6.2. Metodologia e apparecchiature utilizzate .....	48
6.2.1. Cobot UR3e .....	48
6.2.2. Tobii Pro Glasses 3 .....	50

6.2.3.	Empatica E4.....	54
6.2.4.	RealWear Navigator 520.....	56
6.2.5.	Computer portatile (schermo).....	58
6.2.6.	Istruzioni.....	59
6.3.	Descrizione esperimento.....	62
7.	ANALISI DEI DATI RACCOLTI.....	75
7.1.	Metodologia e analisi.....	75
7.2.	Analisi dei dati e risultati dell'indagine sul carico cognitivo .....	76
7.2.1.	Misure oggettive .....	76
	<i>Durata assemblaggio</i> .....	77
	<i>SCL</i> .....	82
	<i>SCR</i> .....	89
	<i>Average duration of whole fixations</i> .....	90
	<i>Average whole fixation pupil diameter</i> .....	93
	<i>Average peak velocity of saccades</i> .....	96
	<i>Average amplitude of saccades</i> .....	99
	<i>Number of whole fixations/durata assemblaggio</i> .....	101
	<i>Number of saccades/durata assemblaggio</i> .....	103
7.2.2.	Misure soggettive (o valutazioni percettive): i questionari .....	106
	<i>NASA-TLX</i> .....	107
	<i>SUS</i> .....	109
	<i>SAM</i> .....	113
7.2.3.	Errori di processo.....	115
8.	CONCLUSIONI.....	117



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Evoluzione del ruolo dell'essere umano e dei bisogni nel settore manifatturiero (Zhang et al., 2023).....	14
Figura 1.2 Evoluzione dell'Industria nel tempo (Lu Y et al., 2022).....	16
Figura 2.1 Modelli di cobot dell'UR: da sinistra verso destra UR3, UR5, UR10, UR16 ( <a href="https://www.universal-robots.com/it/blog/quali-sono-le-caratteristiche-fisiche-e-i-limiti-dei-cobot/">https://www.universal-robots.com/it/blog/quali-sono-le-caratteristiche-fisiche-e-i-limiti-dei-cobot/</a> ).....	20
Figura 2.2 Interazione human-robot e principali indicatori (R. Galin & R. Meshcheryakov, 2020).....	22
Figura 2.3 Tipologie di collaborazione human-robot ( <a href="https://carretta.it/soluzioni/cobot-robot-collaborativi/">https://carretta.it/soluzioni/cobot-robot-collaborativi/</a> ).....	23
Figura 2.4 Categorie di interazione human-robot (El Zaatari et al., 2019) .....	25
Figura 2.5 Le quattro modalità operative collaborative identificate dagli standard di sicurezza dei robot 10218-1/2:2011.....	28
Figura 5.1 Continuum Realtà-Virtualità (Milgram & Kishino, 1994).....	38
Figura 5.2 Processo del Video see-through .....	40
Figura 5.3 Processo del Optical see-through.....	41
Figura 5.4 Classificazione dispositivi AR basata sulla posizione assunta rispetto all'operatore e all'ambiente. A sinistra, dispositivi indossabili sulla testa; al centro, dispositivi portatili; a destra, dispositivi spaziali (Suzuki et al., 2022).....	42
Figura 6.1 Schema della stazione di lavoro (Mind4Lab, Politecnico di Torino).....	48
Figura 6.2 Cobot UR3e utilizzato nelle prove sperimentali ( <a href="https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/">https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/</a> ).....	49
Figura 6.3 Tobii Pro Glasses 3 utilizzati nelle prove sperimentali ( <a href="https://www.monash.edu/business/about-us/research-and-education-facilities/mbbl/our-facilities/hardware/tobii-eye-trackers">https://www.monash.edu/business/about-us/research-and-education-facilities/mbbl/our-facilities/hardware/tobii-eye-trackers</a> ).....	50
Figura 6.4 Foveal vision (Bergstrom et al., 2014).....	51
Figura 6.5 Specifiche tecniche dei Tobii Pro Glasses 3 ( <a href="https://www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/#">https://www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/#</a> ).....	52
Figura 6.6 Foto di una partecipante che indossa Tobii Pro Glasses 3 con RealWear durante una condizione di assemblaggio proposta .....	53
Figura 6.7 Empatica E4 e i sensori di cui si compone.....	55
Figura 6.8 RealWear Navigator 520 .....	56

Figura 6.9 Tecnologie di Realtà Estesa. La Realtà Assistita (aR) mostra le informazioni senza alterare la percezione del mondo reale ( <a href="https://blog.amaxperteye.com/what-is-assisted-reality-here-is-what-you-need-to-know">https://blog.amaxperteye.com/what-is-assisted-reality-here-is-what-you-need-to-know</a> ) .....	57
Figura 6.10 Setup dell'esperimento. Da come si può vedere il computer mostra le istruzioni ed è posizionato all'estrema sinistra del banco di lavoro, in modo tale da non risultare di impedimento ai partecipanti per il corretto svolgimento dei tasks e da non ostacolare il movimento del cobot. ....	58
Figura 6.11 Esempio di istruzione mostrata ai partecipanti all'inizio della prova di assemblaggio nella condizione che prevede l'utilizzo del cobot. Il robot collaborativo ha compiuto una precedente attività di pick del componente e il partecipante come prima attività deve inserire il bullone nel foro .....	61
Figura 6.12 Esempio di istruzione mostrata ai partecipanti all'inizio della prova di assemblaggio nella condizione manuale. In tal caso, è lo stesso operatore a compiere l'attività di pick&place del componente come prima attività.....	61
Figura 6.13 BoM dello skateboard da assemblare.....	63
Figura 6.14 Componenti variabili dello skateboard da assemblare.....	63
Figura 6.15 Flowchart della sequenza di attività per ciascun partecipante .....	68
Figura 6.16 Figura (a) Il partecipante avvita il dado (DD1) sul bullone, spingendo il bullone durante l'avvitatura (b)Il partecipante posiziona la tavola (TV) sulle basi in modo che il nose della tavola fuoriesca dal banco di lavoro. (c) Il partecipante preleva il bullone (BL2) nell'apposito box per poi inserirlo nel foro. (d) Il partecipante avvita il dado (DD3) dopo aver montato la ruota (RT).....	71
Figura 7.1 Schermata dell'applicazione "Tobii Pro Lab" con cui sono stati processati i video dell'eye-tracking .....	76
Figura 7.2 Confronto tra boxplot dei tempi di assemblaggio registrati dai partecipanti nelle varie condizioni di assemblaggio .....	78
Figura 7.3 Boxplot della differenza tra le durate di assemblaggio registrate dai partecipanti nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S) .....	80
Figura 7.4 Boxplot della durata media di assemblaggio registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio della durata di assemblaggio registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante. ....	82
Figura 7.5 Confronto tra boxplot dei valori registrati di SCL nelle varie condizioni di assemblaggio .....	83

Figura 7.6 Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value.....	84
Figura 7.7 (a) Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-aR e Manuale-aR. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value. (b). Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value .....	86
Figura 7.8 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante..	87
Figura 7.9 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Manuale-aR (M-aR). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipa.....	88
Figura 7.10 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipa.....	88
Figura 7.11 Confronto tra boxplot dei valori registrati di SCR nelle varie condizioni di assemblaggio .....	89
Figura 7.12 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average duration of whole fixations nelle varie condizioni di assemblaggio.....	90
Figura 7.13 Boxplot dei valori differenza dell'Average. duration of whole fixations registrati nella condizione Cobot-aR e Manuale-aR. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value.....	91
Figura 7.14 Boxplot della durata media di Average duration of whole fixations registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Manuale-aR (M-aR). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average duration of whole fixations registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante .....	92
Figura 7.15 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average whole fixation pupil diameter nelle varie condizioni di assemblaggio.....	93

Figura 7.16 Boxplot dei valori differenza dell'Average. whole fixation pupil diameter registrati nella condizione Manuale-aR e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value .....	94
Figura 7.17 Boxplot della durata media di Average whole fixation pupil diameter registrata da ogni partecipante nelle condizioni Manuale-aR (M-aR) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average whole fixation pupil diameter registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante .....	95
Figura 7.18 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average peak velocity of saccades nelle varie condizioni di assemblaggio.....	96
Figura 7.19 Boxplot dei valori differenza dell'Average. peak velocity of saccades registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo (a) e Manuale-aR e Manuale-Schermo (b). (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value .....	97
Figura 7.20 Boxplot della durata media di Average peak velocity of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average peak velocity of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante .....	98
Figura 7.21 Boxplot della durata media di Average peak velocity of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Manuale-aR (M-aR) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average peak velocity of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante .....	98
Figura 7.22 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average amplitude of saccades nelle varie condizioni di assemblaggio .....	99
Figura 7.23 Boxplot dei valori differenza dell'Average. amplitude of saccades registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value.....	100
Figura 7.24 Boxplot della durata media di Average amplitude of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average amplitude of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante .....	100
Figura 7.25 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Number of whole fixations/durata assemblaggio nelle varie condizioni di assemblaggio.....	101

Figura 7.26	Boxplot dei valori differenza del Number of whole fixations/durata assemblaggio registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value .....	102
Figura 7.27	Confronto tra boxplot dei valori registrati di Number of saccades/durata assemblaggio nelle varie condizioni di assemblaggio .....	103
Figura 7.28	Boxplot dei valori differenza del Number of saccades/durata assemblaggio registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value .....	104
Figura 7.29	NASA-TLX utilizzato durante le prove sperimentali ( <a href="https://www.researchgate.net/figure/NASA-TLX-assessment-32_fig4_330747015">https://www.researchgate.net/figure/NASA-TLX-assessment-32_fig4_330747015</a> ) .....	107
Figura 7.30	Dimensioni del carico di lavoro analizzate attraverso il NASA-TLX. ....	108
Figura 7.31	Questionario SUS somministrato ai partecipanti all'esperimento .....	110
Figura 7.32	Procedimento seguito nel caso in cui si processano le risposte dispari del SUS .....	111
Figura 7.33	Procedimento seguito nel caso in cui si processano le risposte pari del SUS	111
Figura 7.34	Grafico a barre con barre di errore dei punteggi medi del SUS riscontrati per ogni condizione di assemblaggio.....	112
Figura 7.35	SAM ( <a href="https://www.researchgate.net/figure/Self-Assessment-Manikin-SAM-Scale-36-The-numbers-in-the-figure-represent-the-scoring_fig1_354605335">https://www.researchgate.net/figure/Self-Assessment-Manikin-SAM-Scale-36-The-numbers-in-the-figure-represent-the-scoring_fig1_354605335</a> ) .....	113
Figura 7.36	Grafico a barre con barre di errore delle dimensioni del SAM riscontrate nelle varie condizioni di assemblaggio .....	114
Figura 7.37	Numero di errori compiuti dai partecipanti con annessa prova in cui sono stati rilevati.....	115
Figura 7.38	Errori compiuti dal cobot per prova di assemblaggio .....	116

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Motivi alla base della nascita e sviluppo dei cobot .....	17
Tabella 2.2 Punti di forza dei cobot .....	18
Tabella 5.1 Classificazione dispositivi AR .....	43
Tabella 5.2 Vantaggi e svantaggi delle istruzioni somministrate tramite schermo e tramite dispositivo AR .....	46
Tabella 6.1 Metriche di eye-tracking ritenute rilevanti per le analisi svolte .....	54
Tabella 6.2 Elenco componenti skateboard .....	63
Tabella 6.3 Elenco delle combinazioni delle componenti variabili dello skateboard per le configurazioni C-aR e C-S con corrispondenti rappresentazioni. Come si può vedere ogni configurazione prevede tre prove e né all'interno delle stesse configurazioni né tra le configurazioni si ripetono le stesse combinazioni .....	65
Tabella 6.4 Elenco delle combinazioni delle componenti variabili dello skateboard per le configurazioni M-aR e M-S con corrispondenti rappresentazioni. Come si può vedere ogni configurazione prevede tre prove e né all'interno delle stesse configurazioni né tra le configurazioni si ripetono le stesse combinazioni .....	66
Tabella 6.5 Sono stati creati quattro gruppi corrispondenti ad una data sequenza di condizioni che viene seguita durante lo svolgimento dell'esperimento. Ad ogni gruppo sono associati tre partecipanti. ....	67
Tabella 6.6 HRC task allocation .....	74
Tabella 7.1 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dai test di normalità e test di significatività rispetto alle varie metriche oggettive prese in esame. In giallo sono evidenziate le coppie di condizioni la cui differenza risulta significativa statisticamente. ....	105
Tabella 7.2 Pro e contro delle misure soggettive .....	106

## LISTA ACRONIMI

**AOI:** *Area Of Interest* (Area di Interesse)

**AR:** *Augmented Reality* (Realtà Aumentata)

**aR:** *Assisted Reality* (Realtà Assistita)

**C-aR:** *Cobot – Assisted Reality*

**C-S:** Cobot – Schermo

**EDA:** *Electrodermal Activity* (Attività Elettrodermica)

**ECG:** *Electrocardiogram* (Elettrocardiogramma)

**GSR:** *Galvanic Skin Response* (Risposta Galvanica della Pelle)

**GUI:** *Graphical User Interface* (Interfaccia Grafica Utente)

**HG:** *Hand Guiding* (Guida Manuale)

**HMD:** *Head Mounted Display* (Display Montato sulla Testa)

**HMPD:** *Head-Mounted Projective Display* (Display Proiettivo Montato sulla Testa)

**HRC:** *Human - Robot Collaboration* (Collaborazione Uomo-Robot)

**HSM:** *Human centric Smart Manufacturing* (Manifattura Intelligente centrata sull'Uomo)

**IAD:** *Intelligent Assist Device* (Dispositivo di Assistenza Intelligente)

**IAR:** *Industrial Augmented Reality* (Dispositivo di Assistenza Intelligente)

**IoT:** *Internet of Things* (Internet delle Cose)

**ISO:** *International Standard Organization* (Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione)

**M-aR:** *Manuale – Assisted Reality*

**MR:** *Mixed Reality* (Realtà Mista)

**M-S:** *Manuale – Schermo*

**NASA:** *National Aeronautics and Space Administration* (Amministrazione Nazionale per l'Aeronautica e lo Spazio)

**TLX:** *Task Load Index* (Indice di Carico di Lavoro)

**OST:** *Optical See-Through* (Visione Ottica Trasparente)

**PAD:** *Pleasure, Arousal, Dominance* (Piacere, Eccitazione, Dominanza)

**PFL:** *Power and Force Limiting* (Limitazione di Potenza e Forza)

**SAM:** *Self-Assessment Manikin* (Manichino di Autovalutazione)

**SCL:** *Skin Conductance Level* (Livello di Conduttanza Cutanea)

**SCR:** *Skin Conductance Response* (Risposta di Conduttanza Cutanea)

**SMS:** *Safety – rated and Monitored Stop* (Arresto Sicuro e Monitorato)

**SSM:** *Speed and Separation Monitoring* (Monitoraggio di Velocità e Separazione)

**SUS:** *System Usability Scale* (Scala di Usabilità del Sistema)

**VST:** *Video See-Through* (Visione Video Trasparente)



## ABSTRACT

L'elaborato di Tesi in oggetto esplora l'uso di bio-sensori a supporto dell'interazione uomo-robot nel contesto manifatturiero, con particolare riguardo all'impiego di robot collaborativi (cobot) e della realtà assistita (aR). La ricerca risulta motivata dalla necessità di migliorare l'efficienza e la flessibilità delle linee di produzione, in risposta alla crescente richiesta di prodotti personalizzati. I cobot, come definiti dalla normativa ISO 10218-1 del 2011, sono *“robot progettati per interagire fisicamente con gli esseri umani in un ambiente di lavoro condiviso”*, rappresentando una soluzione innovativa per creare ambienti di lavoro collaborativi e sicuri, superando le limitazioni dei robot tradizionali.

L'obiettivo principale dello studio è stato valutare l'impatto dell'integrazione di queste tecnologie avanzate sul carico cognitivo degli operatori e sulla loro performance durante varie attività di assemblaggio. È stato condotto un esperimento su un campione di partecipanti, utilizzando vari dispositivi come l'Empatica E4 e il Tobii Pro Glasses 3, al fine di raccogliere dati fisiologici e oggettivi. I risultati indicano che l'uso combinato di cobot e aR riduce significativamente il carico cognitivo rispetto alle configurazioni manuali, come evidenziato da una minore dilatazione pupillare e un minor numero di saccadi. Tuttavia, l'aR ha mostrato di aumentare la frustrazione percepita, sebbene non abbia influenzato negativamente l'esperienza complessiva degli operatori.

In conclusione, l'adozione di cobot e aR in ambienti manifatturieri appare migliorativa dell'efficienza e la qualità del lavoro, pur mantenendo elevati livelli di accettabilità e usabilità. Questo studio fornisce alcune indicazioni per l'implementazione di tali tecnologie, evidenziando la necessità di ulteriori ricerche per ottimizzare l'integrazione e l'adattamento degli operatori a questi nuovi dispositivi.

# 1. EVOLUZIONE DELL'INDUSTRIA 4.0: DA TECHNOLOGY-FOCUSED A VALUE-DRIVEN

Nel corso degli ultimi decenni il sistema industriale ha dimostrato di essere particolarmente mutevole. I processi produttivi che lo caratterizzano hanno subito rilevanti cambiamenti, soprattutto in seguito all'introduzione di nuove tecnologie abilitanti sempre più all'avanguardia, tra cui: sensoristica, IoT, Big Data. L'Industria 4.0 è figlia di una Rivoluzione Industriale che ha apportato significativi mutamenti alla gestione della produzione, con il fine di migliorare la catena del valore. La necessità di raggiungere efficienza ed alti livelli di produttività e qualità rispondenti alla domanda del mercato, ha portato le industrie ad automatizzare i processi industriali attraverso l'utilizzo di robot e tecnologie digitali intelligenti. Con la loro adozione nei contesti industriali, la componente umana si è spesso trovata ad occupare un ruolo secondario nelle logiche produttive o, addirittura, ad essere sostituito dalle stesse tecnologie (Figura 1.1).

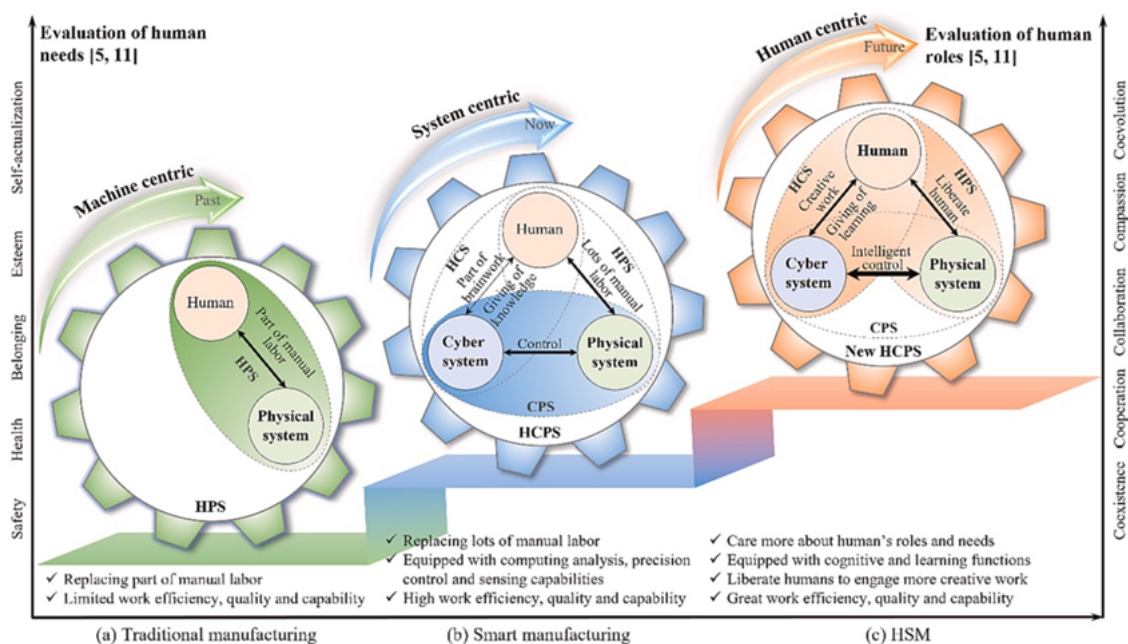


Figura 1.1 Evoluzione del ruolo dell'essere umano e dei bisogni nel settore manifatturiero (Zhang et al., 2023)

Le macchine inserite nel layout sono connesse ai cambiamenti in tempo reale che interessano la linea produttiva, al fine di soddisfare la rete dei fornitori e le esigenze dei clienti. L'Industria 4.0 si concentra sull'automazione dei processi, sulla produttività di massa e sul

miglioramento delle prestazioni, tramite l'utilizzo di tecnologie fisiche (sensori, droni, ecc.) e digitali (*Cloud computing*, *Augmented Reality*, ecc.) (Fadwa Mahiri et al., 2023). Diversamente, l'Industria 5.0 intende sì catturare il valore e i vantaggi apportati dalle innovazioni tecnologiche ma ponendo la sua attenzione anche sull'interazione che l'essere umano ha con quest'ultime, sulle modalità di collaborazione che possono tra loro instaurarsi e sui requisiti emergenti del settore industriale e sociale. Ciò risulta essere in linea con i tre pilastri fondamentali connotanti l'Industria 5.0: resilienza, sostenibilità e “*human-centrality*” (Alves et al., 2023). L'innovativa idea dell'*human-centrality* intende non solo riportare l'essere umano nelle linee produttive, avendo cura del suo stato di salute mentale e fisico, ma vuole anche sfruttarne le capacità cognitive per interconnetterle con i flussi di lavoro dei sistemi intelligenti. L'operatore, pertanto, non appare più come un costo bensì come un investimento, poiché acquisisce nuove competenze in collaborazione con le varie tecnologie con cui lavora. Difatti, la *Human-centric Smart Manufacturing* (HSM) (Figura 1.2) sfrutta appieno, oltre che la flessibilità umana, anche la precisione delle macchine e le tecnologie di nuova generazione al fine di creare un sistema di produzione intelligente, sostenibile e resiliente. La produzione intelligente incentrata sull'essere umano pone il benessere dei lavoratori al centro dei processi produttivi: di conseguenza, le pratiche produttive non sono più guidate unicamente dall'efficienza, dal miglioramento della qualità e dalla riduzione dei costi (Zhang et al., 2023). La sinergia che viene così a crearsi tra uomo e macchina mediante la collaborazione di questi due agenti migliora la qualità dell'ambiente di lavoro, facendo sì che siano le innovazioni tecnologiche ad essere di supporto all'essere umano e non il viceversa (Alves et al., 2023). Ne deriva un approccio focalizzato non più sulla sola tecnologia ma su come l'essere umano utilizza quest'ultima per adattarsi alle diverse esigenze, sfruttando la propria flessibilità e il proprio *know-how*. Punto nevralgico di tale evoluzione è il ruolo che l'uomo ricopre all'interno dello stesso processo e le sue modalità di interazione con gli *assets* aziendali.

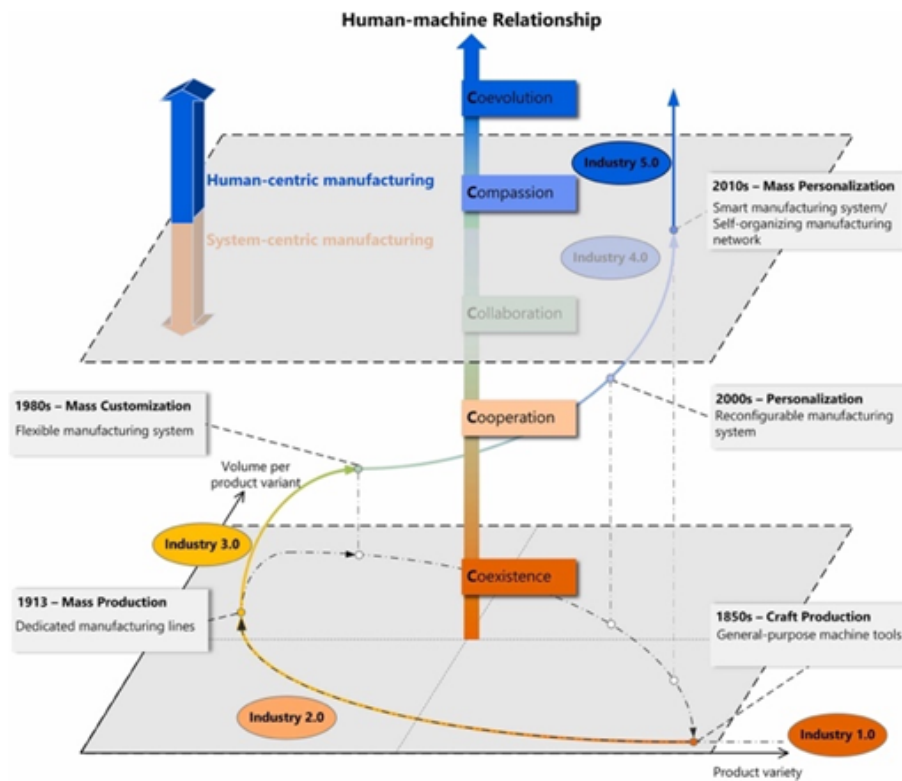


Figura 1.2 Evoluzione dell'Industria nel tempo (Lu Y et al., 2022)

L'uomo collabora con macchine che emulano i comportamenti umani, le quali non solo hanno la capacità di interpretare gli input provenienti dall'ambiente circostante, ma anche l'ulteriore capacità di apprendere come migliorare il proprio funzionamento. Pertanto, si è posto al centro dell'attenzione il tema del *decision making* dell'operatore e del suo carico cognitivo. L'operatore diventa 5.0 come il sistema industriale a cui appartiene e viene messo alla prova con maggiore frequenza all'interno di un contesto produttivo più complesso. L'implementazione di tecnologie sempre più avanzate, quali l'automazione, l'intelligenza artificiale e l'IoT, ha aumentato la complessità della gestione e dell'ottimizzazione dei processi produttivi. Anche la domanda di mercato risulta diversa: difatti, essendo richiesti prodotti più personalizzati e adattabili, aumenta anche la complessità della produzione, poiché viene richiesta una maggiore flessibilità e capacità di adattamento. A causa di tale complessità, la comunicazione e la collaborazione instauratesi tra l'uomo e la macchina assumono notevole importanza: ciò comporta la nascita di nuove tecnologie e strumenti a supporto di tale interazione. A tal proposito, le interfacce di comunicazione uomo-macchina non appaiono più all'operatore come i soliti schermi in linea di produzione ma, al contrario, essi diventano strumenti indossabili di Realtà Aumentata o Virtuale, che pur rendendo più agevole ed efficiente l'operato dell'essere umano ne riformulano il bagaglio di *skills* richieste.

## 2. I COBOT E I PROCESSI COLLABORATIVI

### 2.1. Definizione e concetti chiave sui robot collaborativi.

I cobot (o “*collaborative robots*”) sono i protagonisti dell’Industria 4.0. La normativa tecnica ISO 10218-1 2011 li definisce come “*robot destinati ad interagire fisicamente con gli esseri umani in uno spazio di lavoro condiviso*”. I cobot permettono all’operatore umano di intraprendere una collaborazione sinergica, fatta di *workspaces* condivisi e assenza di barriere che dividono la matrice umana da quella robotica, ottenendo maggiore efficienza tanto in termini di produzione quanto nell’uso dello spazio in fabbrica (Weiss et al., 2021). Di contro, i sistemi robotici tradizionali richiedono protezioni e sistemi di sicurezza che riducono la flessibilità, aumentano i costi e lo spazio richiesto (Matheson et al., 2019).

Il mercato attuale impone che i tempi produttivi siano ridotti al minimo con una richiesta di massa di prodotti altamente personalizzati. Ciò comporta che i sistemi di assemblaggio presenti nelle linee produttive siano flessibili e multiuso. I cobot rappresentano un’evoluzione naturale dei robot tradizionali (Tabella 2.1). Essi sono in grado di risolvere le sfide esistenti nell’attuale contesto produttivo, non solo per lo spazio di lavoro condiviso, ma anche perché sono progettati per essere facilmente programmabili da operatori inesperti e per essere proposti, con ruoli diversi, in un flusso di lavoro in continuo mutamento.

Motivi alla base della nascita e sviluppo dei cobot	Descrizione
Maggiore flessibilità nella configurazione del processo produttivo	I cobot sono facilmente riprogrammabili e riadattabili ai cambi di layout, senza richiedere complesse configurazioni o fermi prolungati
Aumento della sicurezza negli ambienti industriali	Maggiore usabilità (minore spostamento dello sguardo e della testa)
	I cobot compiono <i>tasks</i> pericolose per la salute e la sicurezza dell'operatore
Costo sostenibile per PMI	I cobot sono meno costosi dei robot industriali tradizionali (acquisto, manutenzione e costi operativi )
Carenza manodopera qualificata	I cobot permettono alle aziende di mantenere alti livelli di produttività

Tabella 2.1 Motivi alla base della nascita e sviluppo dei cobot

Tali macchine sono state progettate combinando i punti di forza di ambedue le tipologie di agenti (Tabella 2.2). Da un lato gli operatori umani, caratterizzati dalla loro capacità di adattarsi alle procedure, dall'esperienza e dal *problem solving* ma limitati da fattori quali stanchezza, perdita di attenzione e rischi legati alla salute. Dall'altra parte i robot, che eccellono nella ripetibilità, nella precisione e nell'efficienza ma che risultano impossibilitati a svolgere qualsivoglia operazione allo stesso modo della componente umana. Facendo collaborare entrambi gli agenti, risulta possibile trarre vantaggi senza incorrere, teoricamente, nei rispettivi difetti, permettendo in questo modo un incremento dell'efficienza produttiva senza eguali. L'operatore sarà, dunque, più concentrato sulla qualità del lavoro che si appresta a svolgere, poiché le azioni più faticose, ripetitive o pericolose saranno affidate al cobot.

Specifiche generali dei cobot	Descrizione
Struttura meccanica semplice	Struttura antropomorfa: riproduce il movimento del braccio umano con movimenti su sei assi e un involucro di lavoro sferico
	Insieme di bracci interconnessi tramite giunti
	Componenti ergonomici e di materiale leggero
Flessibilità operativa e compattezza	Facilità di integrazione con qualsiasi linea di produzione senza necessità di riconfigurazioni complesse
	Intercambiabilità degli <i>end-effectors</i> ed accessoristica varia
Sicurezza	Limitazione della forza e della velocità
	Sensoristica avanzata
	Arresto immediato in caso di collisione con operatore umano
Facilità di programmazione	<i>Hand-guiding</i> dell'operatore
	Interfacce intuitive ( <i>teach pendant</i> ) che facilitano la comunicazione con l'operatore
Precisione e ripetibilità	Consistente nei <i>tasks</i> ripetitivi
	Alta precisione nei movimenti
Connettività ed integrazione	Capacità di interconnettersi con i sistemi industriali

Tabella 2.2 Punti di forza dei cobot

### 2.1.1. Cenni storici

Il primo prototipo di cobot nacque nel 1994 grazie ad un progetto finanziato dalla General Motors. Lo scopo era quello di creare un dispositivo che assistesse l'operatore nelle mansioni industriali più faticose e ripetitive. Allo stesso tempo, si cercava di risolvere un problema comune alle realtà industriali dell'epoca legato all'ergonomia degli ambienti di lavoro, così come alle malattie professionali che ne derivavano. Nel 1996 J. Edward Colgate e Michael Peshkin, due professori della Northwestern University dell'Illinois, diedero vita al primo cobot della storia. L'anno successivo venne rilasciato un apposito brevetto che lo descriveva come “*un apparato e un metodo per l'interazione fisica diretta tra una persona e un manipolatore controllato da un computer*”.

Per ragioni di sicurezza, i primi esemplari di cobot non erano dotati di propria forza motrice: difatti, era l'operatore che, grazie a pannelli di controllo e periferiche, ne controllava i movimenti e le azioni. La *task* richiesta al cobot consisteva nell'assistere l'operatore nella guida di un carico durante il movimento attraverso un controllo computerizzato.

I cobot, di generazione in generazione, erano caratterizzati da una forza motrice generata internamente sempre maggiore. Si passò, infatti, dai passivi IAD (o “*Intelligent Assist Device*”) a cobot in grado di muoversi in autonomia. Nel 2004, KUKA, azienda tedesca pioniera nel campo della robotica industriale, lanciò sul mercato “LBR3”, il primo cobot con queste caratteristiche: quest'ultimo era molto leggero, dotato di capacità di controllo del movimento da remoto e di alimentazione propria.

Nel 2008 anche l'Universal Robot, azienda danese leader nella produzione di robot industriali collaborativi, lanciò il suo primo cobot. L'“UR5” è un robot antropomorfo a 6 assi e del peso di soli 18 kg. Il suo *payload* è di 5 kg, con uno sbraccio di 85 cm.

Negli anni successivi, l'azienda propose il modello “UR10”, caratterizzato da un *payload* di 10 kg ed uno sbraccio di 130 cm. Nel 2015 si aggiunse alla famiglia “UR3”, con una capacità di carico di soli 3 kg, pronto ad affiancare nei banchi di lavoro gli operatori. Infine, nel 2019 venne introdotto l'“UR16”, progettato per lavorare con carichi elevati: difatti il carico utile posseduto da questo cobot è di ben 16 kg (Figura 2.1).

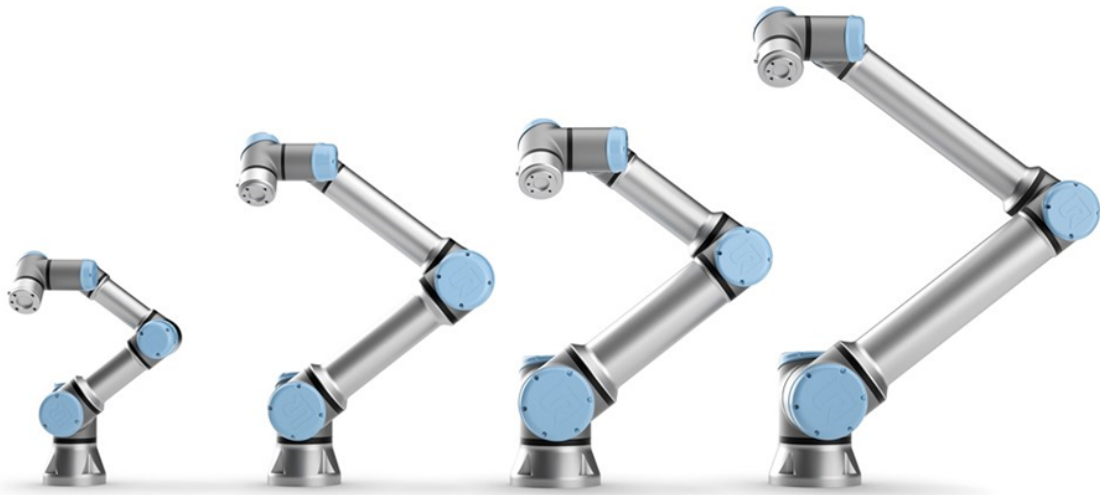


Figura 2.1 Modelli di cobot dell'UR: da sinistra verso destra UR3, UR5, UR10, UR16 (<https://www.universal-robots.com/it/blog/quali-sono-le-caratteristiche-fisiche-e-i-limiti-dei-cobot/>.)

## 2.2. Human-robot collaboration (HRC)

### 2.2.1. Il concetto di collaborazione

Si può affermare con assoluta certezza che il concetto di collaborazione accompagni l'essere umano fin dalla primissima età. Difatti, l'interazione sociale umana poggia le sue basi sul comportamento collaborativo.

Nell'ottica degli argomenti che verranno trattati successivamente, è opportuno compiere una distinzione tra due concetti che, seppur trattati come sinonimi, differiscono sensibilmente tra loro se si indaga sulle rispettive caratteristiche tecniche: il concetto di *cooperazione* e di *collaborazione*. Il primo viene descritto come una relazione organizzata tra i partecipanti che, seppur non accumulati dalla stessa visione (Schöttle et al., 2014), perseguono un comune obiettivo. Quest'ultimo può essere raggiunto anche lavorando in autonomia, seppur la responsabilità del risultato finale è di tutti.

Al contrario, la collaborazione è una forma di interazione sociale in cui gli agenti, compiendo atti più congiunti che individuali, raggiungono un obiettivo comune, con un coordinamento abbastanza complesso (Ali, 2012). Secondo Bratman (1992), per far sì che la diretta



interazione tra i partecipanti porti al risultato sperato, l'attività collaborativa congiunta deve possedere le seguenti caratteristiche.

In primo luogo, bisogna che ci sia reattività reciproca: ciascun partecipante agisce in maniera reattiva tenendo conto che gli altri stiano facendo lo stesso. *In secundis*, vi è l'impegno al sostegno reciproco e a quello verso l'attività congiunta: l'impegno di ciascuno è commisurato alle proprie responsabilità. Di conseguenza, il lavoro cooperativo viene visto come un compito portato a termine dividendo il carico tra i partecipanti, responsabili ognuno di una parte del problema. Il lavoro collaborativo, invece, necessita di uno sforzo coordinato tra i partecipanti per risolvere il problema (Gervasi et al., 2020).

Pertanto, dato le seguenti condizioni da soddisfare, la collaborazione risulta essere la forma di interazione più complessa tra le due presentate. Nella collaborazione umana assumono grande rilievo le azioni congiunte e l'adattamento delle stesse durante l'interazione con un altro individuo nel tempo e nello spazio. Gli esseri umani, che collaborano in vista di un obiettivo condiviso, devono coordinare le loro azioni, il più delle volte attenendosi ad una precedente pianificazione delle stesse. Se ciò non accade, tra i due agenti nasce una coordinazione spontanea. Ovviamente in questo caso il senso di coordinamento richiesto agli agenti è più forte, così come la necessità di mantenere forti le percezioni reciproche e il senso dell'osservazione (Ali, 2012).

Nella collaborazione la comunicazione gioca un ruolo importante. Essa è il mezzo attraverso cui si riescono a coordinare le attività e a portare a termine quanto prestabilito. Esistono anche i gesti o altri atti comunicativi per sostenere l'attività congiunta. Ad esempio, posizionare un oggetto in una specifica posizione può essere d'aiuto per chi deve compiere la successiva azione: un modo efficiente per creare un terreno comune e per coordinare le azioni (Clark, 2005).

### 2.2.2. *La collaborazione human – robot*

L'industria 4.0 ha le sue fondamenta nella flessibilità, nell'efficienza e nella produttività. I sistemi robotici diffusi in precedenza non erano in grado di garantire questi principi, in quanto le notevoli dimensioni e la difficoltà di programmazione non si confacevano a quanto richiesto dalla *smart factory*. Nello specifico, i robot industriali tradizionali sono in grado di eseguire con continuità i compiti per i quali sono stati programmati, mantenendo un alto grado di velocità, precisione e ripetibilità, con standard troppo elevati per gli esseri umani.

Di contro, non possedendo la giusta versatilità, i robot industriali non possono essere adattati in modo efficiente ad ambienti di lavoro dinamici e/o cambiamenti della produzione (Villani et al., 2018).

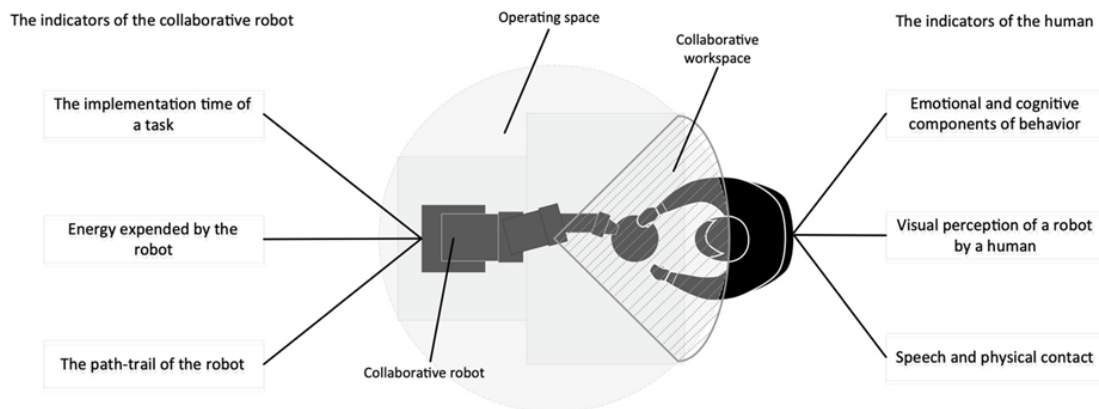


Figura 2.2 Interazione human-robot e principali indicatori (R. Galin & R. Meshcheryakov, 2020)

Al fine di ricercare e ottenere gli obiettivi prima elencati nasce la *Human Robot Collaboration* (HRC), una forma di interazione diretta tra umano e robot finalizzata principalmente al raggiungimento di un obiettivo comune (Gervasi et al., 2020). Quest'ultima può essere considerata come un sottoinsieme della *Human Robot Interaction* (HRI), un campo di studi che affronta questioni legate alle tecniche di studio, progettazione, costruzione e valutazione di un sistema *human-robot* (Goodrich MA & Schultz AC, 2007). Lo scopo principale dell'HRC è il raggiungimento di una convivenza sicura e una forma di interazione il più naturale possibile tra cobot e operatore umano, finalizzata ad aumentare la produttività ed a potenziare le capacità umane, con un miglioramento anche in termini di produttività e sicurezza (Weiss et al., 2021). Alla base della HRC vi è la volontà di combinare le capacità umane con quelle dei robot (Figura 2.2). Hoffman G. e Breazeal C. (2004) sostengono che anche umani e robot condividono lo stesso obiettivo e si impegnano per raggiungerlo. Una relazione collaborativa tra compagni di squadra richiede, però, che si utilizzi un *pool* di conoscenze condivise e basi comuni. I membri del *team* possono lavorare singolarmente, ma il lavoro non può essere completato senza l'ausilio degli altri membri (Scholtz J., 2003).

Allo stesso tempo, l'implementazione dell'HRC introduce un corollario di temi legati alla sicurezza dell'individuo, al *workspace* in cui lavora e agli aspetti sociali e psicologici che derivano dalla collaborazione.

Come già detto precedentemente, fin dal principio i robot sono stati implementati all'interno del settore manifatturiero per eseguire compiti ripetitivi e semplici, ma di grande peso per gli operatori. Dal momento in cui i cobot hanno fatto il loro ingresso nella produzione manifatturiera, accompagnati dai relativi progressi tecnologici, si sono potuti esplorare nuovi modi per interagire con un ambiente dinamico e flessibile. I *layout* aziendali hanno bisogno di conformarsi alla domanda vasta ed eterogenea del mercato più facilmente.

Infatti, ciò che sembra aver spinto i produttori a modificare i preesistenti ambienti di lavoro per renderli più collaborativi ed efficienti, soprattutto in termini di risposta, risulta essere la domanda di prodotti customizzati ed in linea con le esigenze del singolo. Secondo recenti studi sulla collaborazione *human-robot* all'interno di un'architettura di produzione intelligente, si indica come principale vantaggio dell'implementazione dei cobot un notevole aumento della produttività, con tassi di produzione più elevati e tempi ciclo minori (Arents et al., 2021). Questo può essere raggiunto combinando i punti di forza dell'operatore umano (giudizio, esperienza e capacità decisionali) con quelle del robot, quali precisione e velocità.

Le modalità di interazione tra un operatore umano e un robot possono essere categorizzate in quattro tipologie principali (Figura 2.3):

- *Coesistenza*: scenario in cui l'operatore umano e il robot lavorano, senza interagire, su *tasks* ed obiettivi differenti. Il *workspace* è condiviso e non necessita di barriere fisiche tra gli agenti. Nonostante la limitata connessione tra gli stessi, è comunque garantita la flessibilità e l'efficienza del processo produttivo (Gaz et al., 2018);

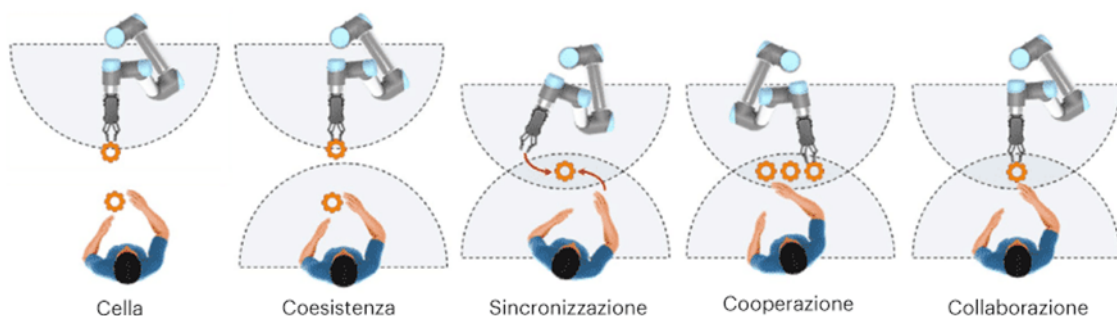


Figura 2.3 Tipologie di collaborazione human-robot (<https://carretta.it/soluzioni/cobot-robot-collaborativi/>)

- *Sincronizzazione*: l'operatore umano e il robot lavorano nello stesso *workspace* ma in tempi diversi (Matheson et al., 2019). La comunicazione tra loro avviene tramite il rilascio di *feedback* ed istruzioni, strumenti necessari per il livello di coordinazione

e sincronizzazione richiesto per questa tipologia di interazione, senza che si incorra in potenziali interruzioni;

- *Cooperazione*: l'operatore e il cobot, ognuno avente proprio ruolo e responsabilità, lavorano contemporaneamente per un obiettivo condiviso, grazie ad una chiara divisione delle attività da compiere (Gervasi et al., 2023);
- *Collaborazione*: l'operatore e il robot lavorano sinergicamente verso lo stesso obiettivo in un *workspace* condiviso, condividendo risorse e informazioni (El Zaatari et al., 2019; Segura et al., 2021). Il successo o meno di questa interazione è dettato dalla qualità della stessa, visto che l'operato dell'uno influenza quello dell'altro.

Va osservato, però, che in letteratura vi sono molteplici terminologie e classificazioni differenti sul tema appena descritto, motivo per cui non esiste un elenco univoco delle possibili relazioni che si instaurano tra un operatore umano e un robot. Difatti, alcuni ricercatori (El Zaatari et al., 2019; Segura et al., 2021) hanno creato un'ulteriore classificazione dei vari livelli di HRC, con il fine di stabilire un approccio standardizzato alla collaborazione. Le quattro categorie di interazione da loro individuate risultano essere (Figura 2.4):

- *Indipendente*, che si manifesta quando esseri umani e cobot si concentrano individualmente su differenti *tasks*. Nonostante non ci sia interazione, adottare il robot comporta, comunque, un aumento di produttività ed efficienza;
- *Sequenziale*, che prevede, per l'appunto, una collaborazione sequenziale mentre si opera sullo stesso pezzo. Appare ideale per quei prodotti che necessitano di precisione e, al contempo, accompagnano un processo decisionale. Esistono dipendenze temporali tra gli agenti per i processi svolti (Barravecchia et al., 2023);
- *Simultaneo*, in cui umano e robot svolgono i rispettivi *tasks*, lavorando contemporaneamente sullo stesso pezzo;
- *Supporto*, l'operatore e il cobot lavorano contemporaneamente per lo stesso obiettivo in modo coordinato. Esiste una dipendenza tra le azioni dell'operatore e quelle del cobot.

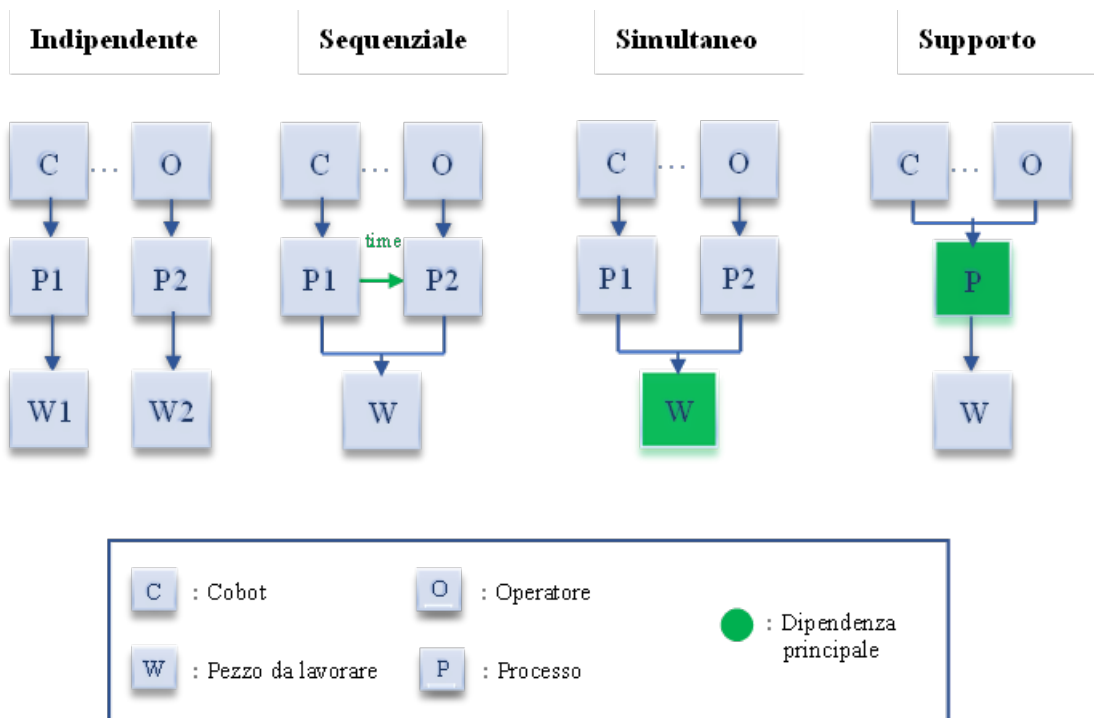


Figura 2.4 Categorie di interazione human-robot (El Zaatari et al., 2019)

Man mano che il grado di collaborazione aumenta, la comunicazione tra operatore e cobot deve essere sempre più immediata e affidabile, affinché l'interazione non porti a risultati non voluti. L'essere umano deve sfruttare interfacce utente, linguaggi del corpo o la parola. Pertanto, tecniche di programmazione più avanzate, che includono l'ottimizzazione e l'apprendimento, sono fondamentali per permettere al cobot di avere una comprensione semantica dell'obiettivo e delle intenzioni dell'operatore umano al quale si va ad affiancare all'interno del *workspace* (El Zaatari et al., 2019).

Quando la collaborazione *human-robot* ha luogo, si crea un *team* in cui il singolo agente sfrutta i vantaggi congiunti dell'altro agente per completare un dato *task* o processo. Si ricordi che il più grande vantaggio portato dai robot collaborativi risiede, difatti, nell'opportunità di combinare i vantaggi dell'automazione con la flessibilità e le competenze cognitive e trasversali dei lavoratori umani (Villani et al., 2018). Come espresso da Harriott et al. (2015), nonostante possa comparire l'eventualità che alcune attività del processo collaborativo siano assegnate al singolo agente, il *task* non risulta completato fino a quando le due parti del *team* creatosi non abbiano portato a termine le loro responsabilità, sia condivise che individuali.

Segura et al. (2021) affermano che l'operatore umano può potenzialmente ricoprire tre ruoli all'interno di un processo collaborativo:

- *Supervisore*: se si pensa ad un rapporto del tipo *master-slave*, l'operatore umano assume il ruolo di *master* mentre il cobot assume il ruolo di soggetto esecutore. Nel settore manifatturiero, tale ruolo è correlato al compito di insegnamento tramite dimostrazione, nel quale l'operatore indica al cobot come quest'ultimo deve eseguire un certo *task*, controllandone anche la qualità e il tempo di produzione;
- *Peer*: l'operatore e il cobot stabiliscono e seguono reciprocamente il ritmo durante il compito;
- *Subordinato*: il cobot nella relazione *master-slave* assume il ruolo di *master*. In tale contesto, il robot deve possedere le capacità di apprendimento e sistemi di visione per ispezionare, condurre e convalidare il processo, collaborando ovviamente con l'operatore.

Alcuni studi indagano principalmente il caso in cui operatore e robot ricoprono nel *team* un ruolo alla pari. A tal proposito, Schmidtler et al. (2015) differenziano il collaboratore dal cooperatore. Il primo ha gli stessi obiettivi del robot con cui lavora per completare un'attività congiunta. L'operatore, in questo caso, è un compagno di squadra posto sullo stesso livello gerarchico del robot, con cui collabora simultaneamente. Il cooperatore, invece, non dipende direttamente dal robot a causa di una rigida allocazione dei compiti tra le parti. Tuttavia, il completamento dei compiti da parte di entrambi è condizione necessaria al raggiungimento dell'obiettivo condiviso (Onnasch & Roesler, 2021).

Il robot si è, quindi, trasformato in un "*partner*" con il quale l'operatore ha necessità di comunicare ed interagire. Grazie all'ausilio di interfacce intuitive e sistemi sensoriali non è necessario che l'operatore abbia una specifica competenza tecnica per comunicare efficacemente con il robot ed operare con esso. Questo spostamento verso mezzi di comunicazione più intuitivi e naturali ha trasformato la natura del lavoro da reattiva a proattiva (Othman & Yang, 2023).

Introdurre la robotica all'interno delle linee produttive non è stato uno *step* facile e veloce, poiché ciò ha creato una sfida anche per lo stesso operatore, il quale ha dovuto reinterpretare la modalità dello svolgimento dei propri *tasks*, così come la sua attività motoria, le prestazioni, la salute e la sicurezza (Müller et al., 2017). Proprio per garantire la sicurezza

dell'operatore, i cobot sono dotati di sistemi di controllo e di sensori: questi consentono di adattare il loro comportamento a quello dell'operatore affinché lo spazio di lavoro condiviso non risulti un problema (Vicentini, 2020).

Nel momento in cui è stata introdotta la HRC ed implementata all'interno delle realtà aziendali, è stato doveroso predisporre norme che regolassero il rapporto collaborativo tra operatore e cobot, al fine di salvaguardare la sicurezza degli agenti. Negli scenari aziendali tradizionali non collaborativi, era sufficiente che il robot venisse programmato per compiere i medesimi *tasks* ed eseguire le stesse sequenze di azioni, per portare il processo non solo al completamento ma al successo (El Zaatari et al., 2019). Ma con i cobot è risultato essenziale inserire funzionalità che garantissero la sicurezza degli operatori, come sensori di distanza o limitatori di velocità. L'Organizzazione Internazionale per la Normazione (ISO) ha sviluppato pratiche standardizzate per il controllo della sicurezza durante l'interazione *human-robot*, gradualmente adottate dalle industrie manifatturiere. A tal proposito, la norma UNI EN ISO 10218-1/2, la quale è stata soggetta a vari aggiornamenti nel tempo, identifica quattro modalità di controllo della sicurezza in situazioni collaborative (Figura 2.5):

- *Safety-rated monitored stop (SMS)*: viene presentato come il tipo di collaborazione più semplice, in cui i due agenti possono lavorare all'interno dello spazio di lavoro ma non contemporaneamente. L'ingresso di un operatore nell'area di lavoro determina l'arresto del robot, che non può riprendere il suo normale funzionamento fino a quando l'operatore è nel *workspace*. Viene usato quando il processo prevede il cobot che lavora principalmente da solo, con l'ingresso occasionale di un operatore nello spazio di lavoro. Poiché l'arresto del cobot non avviene in emergenza, quest'ultimo riprende dal punto di interruzione;
- *Hand guiding (HG)*: l'operatore trasmette manualmente i comandi di movimento al robot con dispositivi situati in prossimità dell'*end effector*. Nel momento in cui l'operatore si avvicina alla zona, il programma ed i movimenti del robot si interrompono;
- *Speed and separation monitoring (SSM)*: è possibile la contemporanea movimentazione dell'operatore e del robot all'interno del *workspace*, purché venga rispettata la distanza di sicurezza protettiva prevista, controllata attraverso dei sensori di monitoraggio. Quando la distanza di separazione scende al di sotto di quella protettiva, il cobot si arresta. Il funzionamento di quest'ultimo riprende non appena

l'operatore si allontana dall'area di arresto. Quando la velocità del sistema robotico viene ridotta, la distanza di separazione protettiva diminuisce di conseguenza (Matheson et al., 2019);

- *Power and force limiting (PFL)*: l'operatore lavora a fianco del robot, la cui forza e potenza sono limitate, al fine di gestire al meglio possibili collisioni.

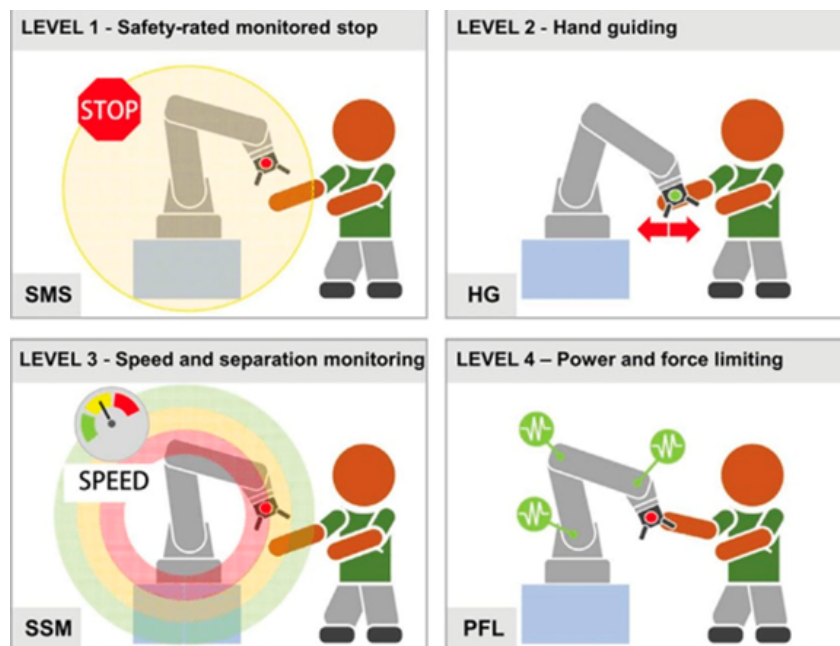


Figura 2.5 Le quattro modalità operative collaborative identificate dagli standard di sicurezza dei robot 10218-1/2:2011

### 2.3. Assemblaggio manuale

Recentemente, nel settore manifatturiero si è assistito ad una crescente necessità di rispondere in maniera proattiva ad una domanda da parte del mercato in continuo cambiamento. Affiancare i robot agli operatori umani, in particolare nelle linee di assemblaggio, è stata una prima risposta a questi bisogni. La sfida di qualsivoglia realtà aziendale consiste, infatti, nel completamento della commessa in tempi molto ridotti mantenendo, tuttavia, un alto grado di personalizzazione, se richiesto. Soddisfare le esigenze del singolo ma con l'efficienza di una produzione di massa richiede sistemi flessibili, versatili e facilmente configurabili (Rossi e Lombardi, 2017): il tutto è raggiungibile anche grazie all'integrazione della cobotica industriale nelle linee di assemblaggio.

Con *assemblaggio* si indica la serie di operazioni di composizione di parti mediante operazioni in gran parte reversibili (avvitatura, unione, ecc), ovvero una semplice



giustapposizione di componenti a formare assiemi, gruppi e prodotti finiti. Solitamente il flusso di materiali nelle linee di assemblaggio si presenta lineare, con un *throughput* totale dato dal collo di bottiglia. L'introduzione dei cobot in tali stazioni permette di diminuirne il tempo ciclo ed evitare che diventino colli di bottiglia temporanei, con conseguenze positive sulla produttività dell'intero ciclo produttivo (Cohen et al., 2019).

Interessante è l'analisi svolta da Barravecchia et al. (2023) sulle possibili interazioni *human-robot* che insorgono durante le attività di assemblaggio. Le relazioni che vengono a crearsi, nelle varie fasi, tra gli agenti sono paragonate alle differenti forme di rapporto simbiotico esistenti in natura, con i loro impatti positivi e negativi sugli attori coinvolti. La relazione simbiotica vantaggiosa sia per l'operatore che per il robot è rappresentata dal *mutualismo*, ove si lavora insieme per raggiungere un obiettivo condiviso, apportando le proprie abilità e punti di forza. Ad esempio, durante le operazioni di fissaggio di viti e bulloni, vengono sfruttate tanto la precisione e la velocità del robot tanto la capacità cognitiva dell'umano per ottenere un vantaggio reciproco in termini di efficienza e produttività. Diametralmente opposta a quanto appena descritto è, invece, l'*incompatibilità*, situazione che vede l'impossibilità di condividere il lavoro senza imbattersi in inefficienze e pericoli. Ciò accade nel corso delle attività di saldatura robotizzata, durante le quali l'operatore è solo un ostacolo al raggiungimento dell'obiettivo, rischiando di mettere a repentaglio la propria salute. *In medias res* vi è il *neutralismo*, rapporto che vede sia l'umano che il robot lavorare senza influenzarsi vicendevolmente, operando in aree diverse e su *tasks* altrettanto diversi. Si ha, poi, il *commensalismo*, relazione simbiotica in cui solo un agente trae vantaggio dal lavorare a stretto giro con l'altro senza però danneggiarlo, relazione che si manifesta durante il carico di materiali pesanti da parte del robot finito il suo assemblaggio. Se, invece, il lavoro di un agente avviene a scapito dell'altro, allora si parla di *parassitismo*.

Analizzando nello specifico l'assemblaggio manuale, quest'ultimo è un processo di fabbricazione che prevede l'utilizzo di varie tecniche di allineamento e fissaggio per collegare insieme due o più parti meccaniche e/o sottoinsiemi (Ikeuchi K. & Suehiro T., 1992). Le operazioni manuali che compongono un'attività di assemblaggio manuale possono essere così classificate (Boothroyd G. et al., 2010; Nof S. Y. et al., 1997):

- *Identificazione*: l'operatore identifica le parti da assemblare e gli strumenti di cui deve servirsi. Poiché questa fase contribuisce indirettamente all'assemblaggio, viene vista come un'attività di supporto;

- *Movimentazione*: il materiale viene spostato sul banco di lavoro;
- *Allineamento*: la parte attiva di un pezzo meccanico viene posizionata su quella di una seconda parte;
- *Unione*: l'operatore collega le due parti che risultano come un unico pezzo, fissato irreversibilmente o meno;
- *Regolazione*: è importante che i componenti appena assemblati siano ben regolati per garantire il corretto funzionamento del pezzo risultante dalla loro unione;
- *Controllo*: fase fondamentale per accertarsi che l'assemblaggio sia andato a buon fine, in cui l'operatore controlla la qualità del lavoro svolto nelle fasi precedenti.

Il concetto di *difficoltà* è definito come il grado di sforzo mentale e fisico necessario per completare un compito. Nell'ambito dell'assemblaggio manuale la *complessità* dipende dalle peculiarità del prodotto o del processo, così come dalla varietà di sequenze di montaggio possibili (Capponi et al., 2024a). Questo comporta sicuramente la necessità di ridefinire, in base alla complessità richiesta, il bagaglio di *skills* richieste all'operatore. Esiste una chiara distinzione tra la *complessità oggettiva* e la *complessità percepita* riscontrata durante l'assemblaggio (Alkan, 2019): la prima rappresenta una proprietà intrinseca del processo stesso e quindi non risulta dipendente dal soggetto che ne prende parte. La seconda, invece, dipende dalla percezione dell'agente, dalle sue capacità ed esperienze pregresse. In linea con la tematica, Capponi et al. (2024b) hanno proposto un metodo che definisce una scala quantitativa sulla complessità percepita durante l'assemblaggio, basata sulla Legge del Giudizio Comparativo di Thurstone.

In particolare, se si fa riferimento al numero di orientamenti possibili che un componente può assumere durante l'assemblaggio, maggiore è il numero di possibili direzioni di movimento della parte, maggiore è il livello di difficoltà registrato (Boothroyd G. et al., 2010). Allo stesso modo, all'aumentare del numero di superfici attive mantenute dall'operatore durante le operazioni di allineamento si nota un aumento della difficoltà. In effetti, quante più parti e strumenti l'utente deve maneggiare, più aumentano le possibilità di incorrere in errori di assemblaggio (Nof S. Y. et al., 1997). Le operazioni di assemblaggio possono seguire una gerarchia, la quale può essere interpretata come un preciso ordine basato sulla priorità. Le operazioni di livello inferiore devono essere eseguite prima delle operazioni di livello superiore, così come i sottoassiemi devono essere assemblati prima dell'intero

prodotto. A tal proposito, più è ampia la gerarchia, più complesso sarà l'assemblaggio (Radkowski et al., 2015).

Nelle operazioni di assemblaggio manuale, gli operatori devono gestire diverse fonti di informazione, selezionare quelle rilevanti e pianificare ed eseguire azioni appropriate. Inoltre, con la crescente richiesta di produzione flessibile e personalizzata, le interfacce che supportano i lavoratori nell'industria manifatturiera diventano sempre più cruciali. Questo è particolarmente vero perché, rispetto ai sistemi di produzione completamente automatizzati con robot industriali, la capacità di elaborazione delle informazioni degli operatori è limitata. Pertanto, la prevenzione degli errori e un flusso di lavoro efficiente dipendono dall'assistenza adeguata fornita agli operatori (Stork & Schubö, 2010).

### 3. ASSISTENZA ALL'OPERATORE TRAMITE ISTRUZIONI

Nel corso della vita quotidiana, le persone devono ripetutamente eseguire compiti che non hanno mai svolto prima e utilizzare strumenti o tecnologie non familiari. Le istruzioni rappresentano il metodo più comune per comunicare come eseguire compiti procedurali inediti. Esse guidano le persone nell'esecuzione di tali compiti, fornendo una descrizione dettagliata dei passaggi e delle regole necessarie per completare quanto richiesto (Andrews, 2001; Farkas, 1999). L'importanza delle istruzioni non risiede solo nella riduzione degli errori e nel miglioramento delle prestazioni ma anche nella possibilità che l'utente possa portare a termine l'attività (Eiriksdottir & Catrambone, 2011).

L'efficacia delle istruzioni dipende dalla tipologia presentata (come le istruzioni procedurali, i principi e gli esempi, che saranno discussi successivamente) e dall'obiettivo pedagogico sotteso al loro utilizzo. Se l'obiettivo è garantire che l'operatore esegua correttamente il compito di assemblaggio fin dall'inizio, le istruzioni devono essere dettagliate e quanto più possibile simili al compito da svolgere. Al contrario, se l'obiettivo è favorire l'apprendimento degli utenti, le istruzioni devono essere più astratte. In questo modo, gli utenti sono incoraggiati a investire maggiormente il loro sforzo cognitivo per apprendere quanto illustrato. È anche vero che più i sistemi e i prodotti da assemblare si presentano sofisticati e complessi più risulta difficile costruire istruzioni che spieghino come utilizzare le numerose e varie strutture disponibili (Eiriksdottir & Catrambone, 2011).

Le istruzioni procedurali sono ciò a cui la maggior parte delle persone fa riferimento quando si parla di "istruzioni" (Bibby & Payne, 1993). Consistono in brevi *instruction statements* che spiegano all'utente quali azioni intraprendere, le condizioni necessarie allo svolgimento e le conseguenze previste (Eiriksdottir & Catrambone, 2011). Le istruzioni procedurali non spiegano i motivi dietro al funzionamento di un sistema o la struttura dello stesso. La sequenza dei passi è cruciale: bisogna seguire l'ordine esatto per ottenere il risultato desiderato.

Generalmente, maggiore è il dettaglio delle istruzioni e il numero di informazioni fornite sulle attività da svolgere, migliore sarà la prestazione iniziale. Tuttavia, ciò avviene a discapito dell'apprendimento, a causa delle strategie cognitive impiegate dagli utenti nell'uso delle istruzioni. Quando le istruzioni procedurali sono simili al compito da svolgere, gli

utenti tendono a elaborarle attraverso il ragionamento analogico. Al contrario, più le informazioni sono specifiche e dettagliate, meno gli utenti sono inclini a impegnare il loro sforzo cognitivo (Eiriksdottir & Catrambone, 2011).

Le istruzioni procedurali si distinguono dai principi, che forniscono informazioni sulle regole e l'ambito del compito, spiegando la struttura e il funzionamento del sistema. Gli esempi, invece, sono istanze specifiche dell'attività che offrono agli utenti un'anticipazione di ciò che dovrebbero aspettarsi quando eseguono il compito descritto.

Wright et al. (1982) ha dimostrato che maggiore è la semplicità d'uso percepita dall'utente che si appresta a compiere una nuova attività, minore è la probabilità che legga le istruzioni a supporto della stessa. Carroll (1990), inoltre, aggiunge che gli utenti preferiscono non seguire le istruzioni ma iniziare a svolgere il compito cercando di comprendere la situazione attraverso l'efficacia delle loro azioni.

Presentare le istruzioni in formato misto (testo corredato da immagini e/o video) migliora l'esecuzione delle azioni (Ganier, 2004) che ne derivano dalla loro lettura, influenzando in positivo la comprensione delle informazioni. L'inserimento di immagini nelle istruzioni facilita la costruzione di un modello mentale più diretto. Infatti, la creazione di una rappresentazione mentale basata esclusivamente sul testo richiede maggiori risorse cognitive, generando un carico cognitivo superiore rispetto all'uso delle immagini. In particolare, le immagini nelle istruzioni sono più efficaci nel presentare informazioni spaziali di un componente rispetto alla descrizione testuale (G.R. Bieger & M.D. Glock, 1985). Pertanto, da un punto di vista pratico, il supporto delle immagini al testo (e non viceversa) migliora l'elaborazione delle informazioni e la costruzione di rappresentazioni mentali, portando a un'esecuzione delle azioni più precisa (Ganier, 2004).

## 4. IL CONCETTO DI CARICO COGNITIVO (O *COGNITIVE WORKLOAD*)

Gli esseri umani dispongono di risorse mentali limitate ed è noto a tutti che il trattamento di qualsiasi informazione comporta l'utilizzo di esse. Chandler e Sweller (1991) hanno definito il carico cognitivo come “*il carico imposto alla memoria di lavoro dall'informazione presentata in un dato istante*”. Il carico cognitivo può essere suddiviso in tre differenti tipologie:

- Carico cognitivo Intrinseco (o *Intrinsic*): è determinato dalla naturale complessità dell'informazione che deve essere processata (numero di elementi da elaborare e loro interazioni). È legato al contenuto da processare, motivo per cui non è facilmente modificabile;
- Carico cognitivo Estraneo (o *Extraneous*): è legato al modo in cui le informazioni sono presentate. Un design poco efficace delle istruzioni e dell'interfaccia può aumentare questa tipologia di carico cognitivo;
- Carico cognitivo Pertinente (o *Germane*): è legato alla costruzione di modelli di pensiero finalizzati alla categorizzazione delle informazioni e alla loro elaborazione.

A tal proposito, Chandler e Sweller (1991) sostengono che l'apprendimento avviene in modo più efficace quando le condizioni di insegnamento si allineano con l'architettura cognitiva umana. Difatti, avendo la mente umana una capacità limitata di memoria di lavoro è importante che essa non venga sovraccaricata. Di contro, il *mental workload* può essere definito come la differenza tra la quantità di risorse mentali disponibili e quella richiesta da uno specifico compito (Hart & Staveland, 1988a). Può essere influenzato dall'esperienza dell'agente, dal suo stato emotivo e dall'affaticamento fisico a cui è sottoposto. Si ha sovraccarico mentale (o *mental workload overload*) quando le risorse mentali disponibili non sono sufficienti per eseguire i compiti richiesti, causando un incremento dello stress e una diminuzione della precisione. Al contrario, si discorre di sotto-carico mentale (o *mental workload underload*) quando le attività assegnate non sfruttano adeguatamente le risorse disponibili, portando a stati di noia. Entrambe le condizioni possono compromettere le prestazioni complessive (Nachreiner, 1995). Risulta importante, quindi, gestire il carico cognitivo di modo che esso non comprometta il corretto svolgimento dei compiti assegnati agli operatori e la sicurezza del loro operato.

## 4.1. Metodi per l'analisi del carico cognitivo

Il *cognitive workload* può essere analizzato utilizzando misure sia soggettive che oggettive.

Nelle prime ricadono i questionari, come il NASA- TLX. Questi sistemi di misura chiedono ai partecipanti di valutare, sotto vari punti di vista, l'esperienza vissuta. Ma i questionari, seppur risultino di facile uso e analisi, portano con sé dei *bias*: l'individuo interrogato potrebbe non ricordare con esattezza l'interazione avuta con un prodotto o sentirsi limitato dalla scala in uso nel rendicontare la sua esperienza. Le misure soggettive dipendono da come gli individui percepiscono le stesse domande e, venendo tipicamente somministrate dopo aver completato un'attività o vissuto un'esperienza, queste ultime risentono in maggior misura del cambiamento che il carico mentale subisce nel tempo (Harriott et al., 2015).

Le metriche oggettive includono le risposte fisiologiche dell'utente e la misura della capacità mentale residua, la quale può essere indagata attraverso l'uso di *secondary task*. Sebbene le prestazioni registrate, valutate in termini di accuratezza ed efficienza, misurino il comportamento dell'utente, i dati fisiologici come l'attività elettrodermica (EDA) o l'*eye-tracking* offrono segnali funzionali delle risposte emotive. Riescono, infatti, a captare con oggettività l'esperienza vissuta dall'utente, con migliori risultati se gli strumenti vengono utilizzati in contemporanea (Bergstrom & Shall, 2014). Inoltre, le risposte fisiologiche possono essere ottenute senza interrompere la ricezione dei dati, permettendo di osservare il reale comportamento e la condizione fisiologica dell'utente *realtime*. Altre metodologie oggettive per misurare il *cognitive workload* includono l'EDA (di cui si parlerà più avanti), l'ECG (elettrocardiogramma) e la pressione sanguigna.

Nelle misure oggettive per la valutazione del carico mentale rientrano anche le valutazioni effettuate sulle prestazioni di un determinato compito. Quest'ultime sono rappresentative dell'esecuzione corretta di un compito, attraverso la valutazione oggettiva del numero di errori effettuati, dell'efficienza dello svolgimento dello stesso compito (es. il tempo di assemblaggio) e dell'accuratezza con il quale viene portato a termine (Gawron V. J., 2008). Le misure di prestazione sono essenziali per valutare l'effetto del carico di lavoro mentale sull'efficienza e sulla precisione dell'operatore. Tuttavia, i dati di prestazione possono essere suscettibili a influenze esterne e a variazioni individuali. Pertanto, è cruciale integrarli con altre metriche per ottenere una valutazione più esaustiva e accurata del carico cognitivo (Claxton Bommer, 2016).

L'aspetto fondamentale da considerare è che è proprio la combinazione delle misure soggettive e oggettive sopra elencate a rendere la valutazione del carico mentale completa ed esaustiva (Harriott et al., 2015).



## 5. REALTÀ AUMENTATA

### 5.1. Definizione e concetti chiave

La tecnologia AR è una tecnologia in cui la percezione visiva naturale di un utente umano si sovrappone alle informazioni generate da un computer (Radkowski et al., 2015), le quali sono solitamente legate al contesto in cui vengono presentate e reattive ai cambiamenti di quest'ultimo. Il risultato è un mondo reale, in cui alle caratteristiche e alle proprietà tangibili e fisiche degli oggetti si affiancano le caratteristiche “visive”, generate dalla computer grafica, come le animazioni e i modelli 3D o icone e testi digitali.

Il primo prototipo di AR fu creato negli anni Sessanta da Ivan Sutherland, un pioniere della computer grafica di Harvard, e i suoi studenti: “*The Sword of Damocles*”. In questo primo dispositivo AR *head-mounted* venivano mostrate forme geometriche sovrapposte alla scena reale attraverso un *display see-through*. Ma è solo agli inizi degli anni '90 che venne coniato il termine “Realtà Aumentata”. A due scienziati della Boeing Corporation venne richiesto di sostituire le istruzioni di cablaggio, raffigurate su alcune tavole di compensato, con altre in formato digitale da proiettare direttamente sul pavimento (T.P. Caudell; D.W. Mizell, 1992). L'accelerato sviluppo e diffusione dell'*Augmented Reality* (AR) negli ultimi anni è strettamente correlato alla costante progressione delle tecnologie *hardware*.

Ciò che differenzia la Realtà Aumentata dalla Realtà Virtuale è che la seconda vede l'osservatore partecipante totalmente immerso in un mondo che può o meno imitare le proprietà di un ambiente del mondo reale, esistente o immaginario, ma che può anche superare i limiti della realtà fisica, creando un mondo in cui le leggi fisiche che governano la gravità, il tempo e le proprietà materiali non valgono (Milgram et al., 1995). I due concetti, più che correlati, diventano così due estremi di un continuum Realtà-Virtualità (Figura 5.1), in cui agli estremi si colloca l'Ambiente Reale da un lato (contenente qualsiasi oggetto reale e /o scena visualizzabile nel mondo reale) e quello virtuale dall'altro, costituito esclusivamente da oggetti virtuali. Tutto quello che è contenuto tra questi due estremi è Realtà Mista (MR): in un unico display si possono trovare input appartenenti e al mondo Reale e a quello Virtuale.

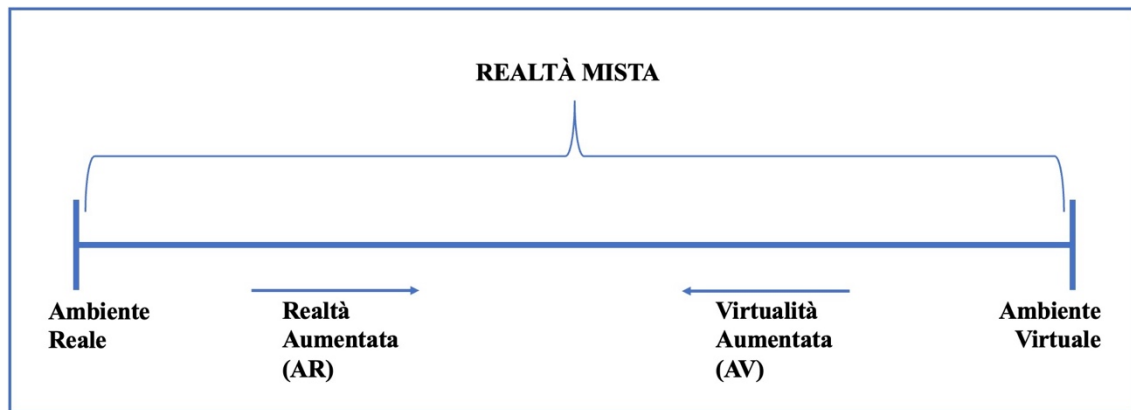


Figura 5.1 Continuum Realtà-Virtualità (Milgram & Kishino, 1994)

Di fatto la Realtà Aumentata vede informazioni virtuali sovrapporsi al mondo reale, al contrario dell'*Augmented Virtuality*, in cui al mondo virtuale si sovrappongono input reali.

Le tecnologie che adottano la Realtà Aumentata cambiano sì la percezione dell'utente che ne fa uso, facendo sì che possa vivere l'ambiente che lo circonda in un nuovo modo, ma senza convincerlo di far parte di un mondo sintetico. Il soggetto resta connesso con tutto ciò che gli è attorno.

La Realtà Aumentata (AR) fa affidamento sull'impiego congiunto della *Computer Vision* e del riconoscimento degli oggetti al fine di sviluppare applicazioni interattive in tempo reale con ampie prospettive. Queste applicazioni trovano impiego in diversi settori:

- Industriale: l'AR guida l'operatore non solo durante le fasi di assemblaggio e disassemblaggio mostrando le istruzioni che gli sono necessarie ma anche in applicazioni di *maintenance* e *training*. Questo settore ha subito un cambiamento notevole a causa della presenza della Realtà Aumentata, che entra in gioco anche durante le fasi di progettazione e produzione;
- Medicina: l'AR fornisce supporto durante la formazione del personale e in ambito chirurgico;
- Videogiochi: numerosi videogiochi sfruttano l'AR per arricchire l'esperienza di gioco;
- Educazione: l'AR è utilizzata nell'ambito educativo per arricchire l'apprendimento degli studenti, offrendo informazioni supplementari come immagini, video e simulazioni attraverso modelli tridimensionali durante la lettura di materiale didattico;

- Turismo: applicazioni AR forniscono informazioni in tempo reale su monumenti e luoghi di interesse turistico;
- Archeologia: in questo contesto, l'AR supporta i ricercatori nella ricostruzione di siti archeologici partendo da strutture esistenti e parzialmente distrutte;
- Architettura: l'AR è stata impiegata per la visualizzazione dei progetti edilizi direttamente nell'ambiente di lavoro, consentendo una visione anticipata dell'edificio prima della sua effettiva costruzione.

Inoltre, la Realtà Aumentata viene applicata in ambiti sensibili come la difesa, la navigazione e l'aviazione. La versatilità di questa tecnologia permette a quest'ultima di avere un ruolo rilevante ed in continua espansione in diversi settori di rilevanza pratica e scientifica.

## 5.2. Panoramica sui *Visual Display AR*

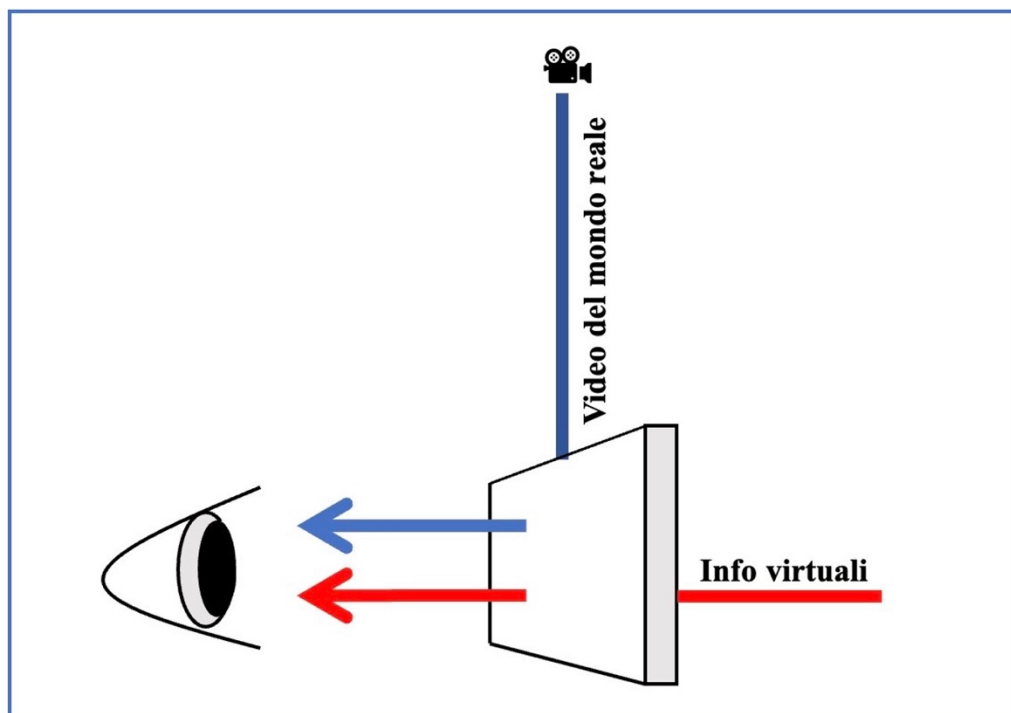
La Realtà Aumentata non è da rilegare ad una particolare tecnologia *display* né al solo senso della vista, in quanto potrebbe essere potenzialmente applicata a tutti i sensi, ma si può dire che la vista, l'udito e il tatto risultano gli input sensoriali maggiormente applicati nei sistemi AR. Quelli di seguito presentati sono i diversi tipi di strumenti AR che permettono di avere una visualizzazione visiva dei contenuti digitali.

### 5.2.1. *Video see-through (VST)*

Tra le modalità di presentazione visive della Realtà Aumentata il più vicino alla Realtà Virtuale è il *Video see-through*. Quest'ultimo riprende l'ambiente che circonda l'utente ed integra ad esso elementi digitali, cosicché possa essere percepito il contesto fisico ma con l'arricchimento di informazioni virtuali (Figura 5.2). Questa tecnologia porta con sé molteplici vantaggi: in primo luogo, poiché la realtà è digitalizzata, risulta più semplice mediare o allontanare oggetti reali, oltre ad essere la scelta più economica e semplice da implementare. Ne risulta una buona integrazione tra reale e virtuale, grazie anche al facile adattamento della luminosità e del contrasto degli oggetti virtuali con le scene della realtà.

Di contro, i limiti legati a questa tecnologia includono la compromessa risoluzione della realtà ed una limitata estensione del campo visivo percepito (nonostante questa limitazione può essere risolta con opportuni accorgimenti). Inoltre, durante l'utilizzo si palesa una condizione di disorientamento dovuta alla deviazione oculare (o parallasse) derivante dalla posizione della telecamera montata sul dispositivo rispetto a quella degli occhi dell'utente.

Questa situazione di disagio vissuta richiede uno sforzo di adattamento continuo e significativo durante tutto il tempo di utilizzo. Un altro svantaggio riguarda la distanza di messa a fuoco che, se non regolabile come in alcuni dispositivi, genera una percezione visiva poco confortevole. Da non sottovalutare nemmeno la stanchezza agli occhi e l'affaticamento in generale che comporta l'uso di tali strumenti, situazione maggiormente riscontrata nei display bioculari, in cui ambo gli occhi condividono la stessa immagine (D.W.F. van Krevelen and R. Poelman, 2010).



*Figura 5.2 Processo del Video see-through*

### 5.2.2. Optical see-through (OST)

La tecnologia OST sovrappone direttamente gli elementi digitali alla vista del mondo reale per mezzo di lenti trasparenti o semitrasparenti (Figura 5.3).

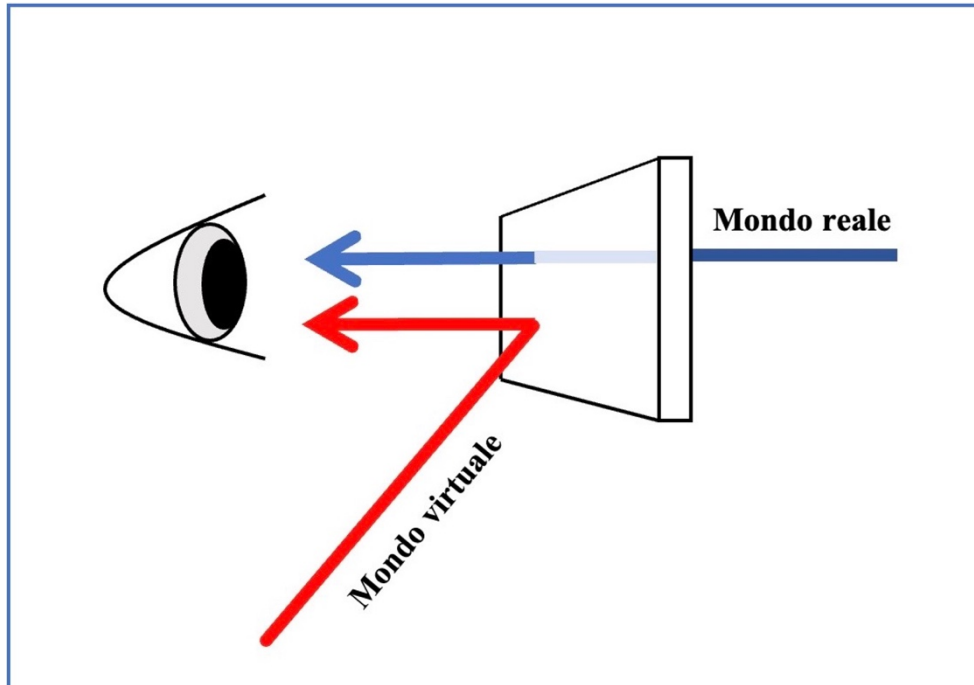


Figura 5.3 Processo del Optical see-through

Rispetto ai sistemi *Video see-through* sopracitati, i quali utilizzano telecamere per catturare il contesto fisico che circonda l'utente, l'*Optical see-through* vede gli oggetti virtuali integrati otticamente all'ambiente attraverso schermi planari o curvi. Si ottiene, così, un'esperienza più integrata ed immersiva poiché gli elementi digitali appaiono più realisticamente appartenenti alla scena reale osservata dall'utente. Questi *display* riescono ad eliminare il problema di parallasse apportato dalla tecnologia precedentemente discussa: l'occhio non subisce nessun offset a causa di un particolare posizionamento della telecamera. La tecnologia OST, inoltre, risulta più sicura in quanto, in caso di mancanza di corrente, continua il suo funzionamento e questo la rende un ottimo strumento per applicazioni militari o mediche. Di contro, combinare gli oggetti virtuali, presentati olograficamente attraverso specchi o lenti trasparenti, riduce il contrasto e la luminosità delle stesse immagini come del mondo reale. Queste condizioni rendono lo strumento poco adatto all'uso openspace (D.W.F. van Krevelen and R. Poelman, 2010).

### 5.2.3. Display proiettivo

Per questi particolari display non è obbligatorio l'uso degli occhiali, motivo per cui le superfici coperte dal campo visivo dell'utente risultano più ampie. È possibile l'interazione con gli elementi virtuali, e potenzialmente anche la loro manipolazione, attraverso sensori o input ad hoc. Le superfici su cui proiettare i contenuti digitali possono variare dalla semplice parete piatta e monocolora a setup più complessi, nonostante sia più indicato l'uso *indoor* per via del contrasto e della luminosità necessarie al corretto funzionamento. Negli aspetti negativi ricade sicuramente la necessità di ricalibrare i proiettori ogni qual volta muta l'ambiente o la superficie di proiezione, calibrazione che può avvenire anche in maniera automatizzata (D.W.F. van Krevelen and R. Poelman, 2010).

Questo particolare strumento AR differisce da un'altra tecnologia nota come "*Projection mapping*" che proietta ugualmente contenuti virtuali su scene reali ma non bisogna di un display per la visualizzazione degli stessi.

### 5.3. Posizionamento dei display AR

È possibile classificare i dispositivi sopra citati in specifiche categorie, rispetto alla posizione che occupano relativamente all'utente e all'ambiente reale (Figura 5.4).

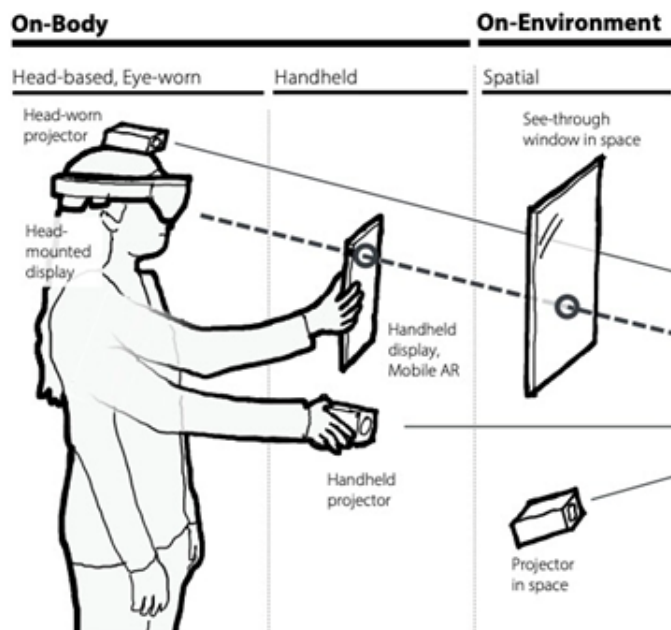


Figura 5.4 Classificazione dispositivi AR basata sulla posizione assunta rispetto all'operatore e all'ambiente. A sinistra, dispositivi indossabili sulla testa; al centro, dispositivi portatili; a destra, dispositivi spaziali (Suzuki et al., 2022)

In primo luogo, vi sono gli HMD (“*Head Mounted Display*”), dispositivi indossabili sulla testa. In questa categoria rientrano i display VST e OST analizzati precedentemente (D.W.F. van Krevelen and R. Poelman, 2010). Appartengono allo stesso gruppo anche il display retinico virtuale (VRD) e quello proiettivo che, una volta montato sulla testa, prende il nome di HMPD (“*Head-Mounted Projective Display*”). Vi è poi la categoria degli *Stationary Devices*, ovvero quei dispositivi inseriti in maniera statica del contesto in cui devono operare. Infine, i dispositivi portatili tra cui figurano i display video/ottici trasparenti portatili e dei proiettori portatili. La Tabella 5.1 mostra un breve riepilogo dei dispositivi AR descritti.

<i>Visual Display AR</i>	Classificazione in base alla posizione dell' <i>hardware</i>	Dispositivi AR	Esempi
<i>Video see-through (VST)</i>	<i>Head Mounted Display (HMD)</i>	<i>AR Glasses</i>	Microsoft HoloLens
<i>Optical see-through (OST)</i>			Google Glass
<i>Display retinico virtuale (VRD)</i>		Visori per Realtà Aumentata	Meta 2 Epson Moverio
<i>Display proiettivo</i>	Dispositivi Fissi ( <i>Stationary Devices</i> )	<i>Smart Helmets</i>	Daqri Smart Helmet
		Proiettori AR	Lightform
	Dispositivi Portatili ( <i>Handheld Devices</i> )	Schermi Interattivi	Tavoli interattivi
		<i>Smartphone e Tablet</i>	ARKit (Apple) e ARCore (Google)
		<i>Controller AR</i>	Leap Motion Controller

Tabella 5.1 Classificazione dispositivi AR

#### 5.4.AR e assemblaggio

Nel momento in cui la tecnologia di Realtà Aumentata è stata introdotta, uno dei contesti applicativi maggiormente esplorati per la causa è stato proprio l’assemblaggio manuale. Fite-Georgel (2011) ha utilizzato il termine “Realtà Aumentata Industriale” (o IAR) per riferirsi all’uso di questa tecnologia all’interno del contesto industriale. Attraverso una telecamera montata nei pressi della postazione di lavoro viene presentato all’operatore un mondo fisico, aumentato con oggetti virtuali nelle postazioni dei marcatori fisici. In tale circostanza l’operatore giova delle caratteristiche visive generate dal computer durante il compimento di alcuni dei propri *tasks* (Radkowski et al., 2015) (scelta della componentistica o della strumentazione, localizzazione del punto di montaggio ecc.). L’implementazione di questa

tecnologia porta ad un miglioramento in termini di efficienza e gli operatori non necessitano più di un'assistenza tecnica esperta. Le informazioni generate dal computer sono sensibili al contesto, registrate spazialmente e sovrapposte alla parte fisica, risultando maggiormente comprensibili (Neumann U. & Majoros A., 1998; Tang A. et al., 2003).

Le prime ricerche indagavano i reali vantaggi di questo strumento innovativo rispetto agli altri mezzi didattici presenti all'epoca, come i manuali cartacei o quelli presentati sui display dei computer. I primi risultati dimostrano una riduzione degli errori di assemblaggio e del tempo totale di assemblaggio, oltre che del carico cognitivo richiesto (Radkowski et al., 2015).

Tuttavia, dai numerosi studi relativi alle varie configurazioni dell'interfaccia, alle caratteristiche visive e alla complessità intrinseca dei prodotti, i risultati che si evincono sono abbastanza eterogenei. Non esiste totale chiarezza sui fattori chiave che determinano il successo di un assemblaggio assistito dalla realtà aumentata. Sembrerebbero essere due i fattori potenzialmente influenti sull'efficacia delle applicazioni AR: la complessità delle caratteristiche visive e la complessità del prodotto. In linea generale, emerge che l'aumentare della complessità delle funzionalità visive nelle istruzioni di montaggio comporta un prolungamento del tempo necessario all'utente per completare un'operazione di assemblaggio. Risulta ampiamente accettato che le caratteristiche visive più semplici vengano identificate più rapidamente e risulteranno più accessibili. A tal proposito, Radkowski et al. (2015) affermano che la complessità della caratteristica visiva debba rispettare il livello di difficoltà richiesta dalla *task* di assemblaggio. Inoltre, il numero di simboli presenti simultaneamente su uno schermo AR deve essere ridotto al minimo per massimizzare le prestazioni complessive. Wiedenmaier S. et al. (2003) sostengono che l'AR riduce i tempi di assemblaggio solo se le *tasks* da compiere sono effettivamente complesse. Nel caso in cui le attività da compiere risultino semplici, non vi è alcuna differenza, in termini di performance, tra le istruzioni cartacee e quelle su strumenti di AR.

Le caratteristiche visive, così come le componenti grafiche, compongono quelle che sono le *Graphical User Interface* (o GUI), utilizzate per migliorare la comprensione dell'utente rispetto alle informazioni che gli vengono presentate. Le interfacce grafiche risultano ben fatte quando non sovraccaricano l'utente e complicano il suo operato (Agrawala M. et al., 2003). L'utente non riesce a prestare attenzione contemporaneamente a più stimoli su una GUI, in quanto la capacità mentale degli individui limita la quantità di informazioni che



questi riescono a gestire e, di conseguenza, le loro prestazioni (Wolfe J. & Horowitz T., 2004). Inoltre, le funzionalità visive e le interfacce 2D sono preferite a quelle 3D quando l'utente ha poco tempo a disposizione per elaborare i dati, in quanto la tridimensionalità può provocare incertezza sulla percezione spaziale e portare l'operatore a ritardare la propria azione (Springmeyer R. et al., 1992; Tory M. et al., 2006).

#### 5.4.1. Istruzioni con AR

La progettazione delle istruzioni a corredo di un assemblaggio svolto con AR è influenzata da tre variabili principali: tipologia di istruzioni, *affordance* e *signifiers* di Realtà Aumentata (combinazione di risorse visive con le loro proprietà) (Laviola et al., 2024). La relazione tra le proprietà di un oggetto e le capacità dell'utente determina il modo in cui l'oggetto può essere utilizzato. L'*affordance* è quindi il risultato di un design ottimale dell'oggetto, che comunica intuitivamente le modalità d'uso. Quando è bassa, diventa necessaria una fonte secondaria di informazioni per garantire un uso corretto dell'oggetto (D. Norman, 1988). Norman (1998) definì questa fonte proprio "*signifier*", intendendo con essa "qualsiasi segno o suono, qualsiasi indicatore percepibile che comunichi un comportamento appropriato ad una persona". Pertanto, utilizzando il termine "significante AR", ci riferiamo a una combinazione di uno o più *assets* visivi in grado di trasmettere informazioni, influenzate da vari fattori. Interessante risulta il concetto di "*minimal AR signifier*": è il contenuto virtuale che riduce al minimo il divario tra le informazioni fornite e quelle necessarie per comprendere l'attività da svolgere (Laviola et al., 2024). Utilizzare più informazioni di quelle necessarie al completamento dell'attività non sarebbe utile agli operatori ma potrebbe comportare solo un aumento di carico e stress. Allo stesso modo, avere meno informazioni di quelle di cui si necessita porterebbe ad interpretazione erronee delle istruzioni presentate allo stesso operatore, con conseguenti inefficienze ed errori. Tuttavia, definire un *minimal AR signifier* non è semplice, perché, seguendo la definizione di *affordance*, il contenuto virtuale minimo potrebbe variare non solo in base alle proprietà dell'oggetto, ma anche alle capacità dell'utente rispetto a un dato scenario di assemblaggio. Pertanto, non esiste un significante AR minimo che funzioni bene in ogni contesto (Laviola et al., 2024).

Di seguito sono presentati in Tabella 5.2 i vantaggi e gli svantaggi delle istruzioni somministrate agli utenti tramite AR e tramite schermo.

Modalità somministrazione istruzioni	Vantaggi	Svantaggi	Letteratura a supporto
Istruzioni con AR	Riduzione significativa del numero di errori durante l'assemblaggio	Tempo di completamento più lungo	(Dorloh et al., 2023); (Loch et al., 2016);  (Institute of Electrical and Electronics Engineers et al., 2013);  (Sudha et al., 2021)
	Maggiore usabilità (minore spostamento dello sguardo e della testa)	Più costoso da implementare	
		Maggiore difficoltà nell'apprendimento dell'uso del dispositivo (resistenza all'adozione)	
Istruzioni con Schermo	Minor tempo di completamento rispetto agli altri metodi	Necessità di accesso ad un dispositivo elettronico connesso all'alimentazione elettrica	
	Meno costoso	Mancanza di adattabilità ai cambiamenti in tempo reale durante l'assemblaggio	
	Adozione più semplice perché più familiare (minor tempo di adattamento)	Necessità di spostare lo sguardo tra il <i>monitor</i> e l'area di lavoro	
	Minore ambiguità		

Tabella 5.2 Vantaggi e svantaggi delle istruzioni somministrate tramite schermo e tramite dispositivo AR

In conclusione, se l'efficacia è misurata principalmente sulla qualità dell'esecuzione (minor numero di errori), l'istruzione tramite realtà aumentata è la più efficace. Se l'efficacia è valutata in base all'efficienza temporale, l'istruzione tramite *display* video è superiore. La scelta della modalità più efficace dipenderà quindi dagli obiettivi specifici e dalle priorità del contesto di utilizzo (qualità vs. velocità). L'analisi ha rilevato che mentre l'AR può ridurre gli errori e migliorare la qualità dell'assemblaggio, non ci sono differenze significative rispetto al video in termini di tempo impiegato. Inoltre, non sono state rilevate differenze significative nel carico mentale tra i due metodi. Questi risultati suggeriscono che, sebbene l'AR possa offrire vantaggi specifici in termini di riduzione degli errori, potrebbe non essere sempre la scelta più efficace rispetto ai metodi tradizionali come i video, a seconda delle circostanze specifiche e delle esigenze del contesto di produzione. Tuttavia, il metodo basato sulla realtà aumentata si è dimostrato più efficace nel ridurre il numero di errori durante l'assemblaggio, il che può indicare una maggiore efficienza qualitativa, sebbene il tempo di completamento non differisca significativamente da quello delle istruzioni video. Se l'efficienza è strettamente definita dal tempo di completamento del compito, non ci sono differenze significative tra l'uso della realtà aumentata e delle istruzioni video.

## 6. PROVE SPERIMENTALI: ASSEMBLAGGIO DI UNO SKATEBOARD

L'esperimento, di seguito descritto, rappresenta l'oggetto di analisi di questa Tesi. Lo scopo è stato progettare un'attività di assemblaggio che si avvicinasse quanto più possibile a quelle presenti all'interno delle linee industriali ma con l'inserimento di tecnologie abilitanti, quali cobot e dispositivo di Realtà Assistita. Difatti ai partecipanti è stato proposto di assemblare uno skateboard in varie condizioni di assemblaggio che prevedessero o meno l'utilizzo di tali dispositivi. L'analisi è volta alla comprensione degli effetti dei vari tipi di assemblaggi proposti sul carico cognitivo dei partecipanti e sulla loro percezione nell'uso del sistema. Per misurare i dati fisiologici dei partecipanti durante l'esperimento si è fatto uso dell'Empatica E4 e dei Tobii Pro Glasses 3 (descritti nel dettaglio nelle sezioni successive) mentre per i dati soggettivi sono stati somministrati dopo ogni prova tre tipologie di questionari: il NASA-TLX, il SUS e il SEM. Per il processamento dei dati e la successiva analisi sono stati utilizzati i software Excel e RStudio.

### 6.1. Campione di partecipanti

Per le prove sperimentali sono stati selezionati 12 studenti del Politecnico di Torino, di cui 4 femmine e 8 maschi di età compresa tra i 24 e i 26 anni. È stata garantito che tutti i partecipanti avessero uguali competenze: alla somministrazione dell'esperimento nessuno aveva mai interagito con un cobot o utilizzato un visore di aR. Questa scelta è stata compiuta al fine di non avere *bias* nei risultati. Inoltre, non sono state fornite informazioni preliminari sull'assemblaggio dello skateboard pre-prova: questo per far in modo che i partecipanti si affidassero unicamente alle istruzioni. È stato inoltre verificato che nessuno dei partecipanti fosse daltonico. Nel caso qualcuno manifestasse problemi alla vista, i Tobii Pro Glasses 3 sono stati equipaggiati di apposite lenti correttive. Ai partecipanti non è stato dato alcun incentivo sul compiere le attività in maniera rapida o sul dover rientrare in un certo intervallo temporale per evitare *bias* sulle durate di assemblaggio riscontrate. Durante l'intera esecuzione dell'esperimento, i partecipanti sono stati in piedi davanti alla stazione di lavoro (Figura 6.1).

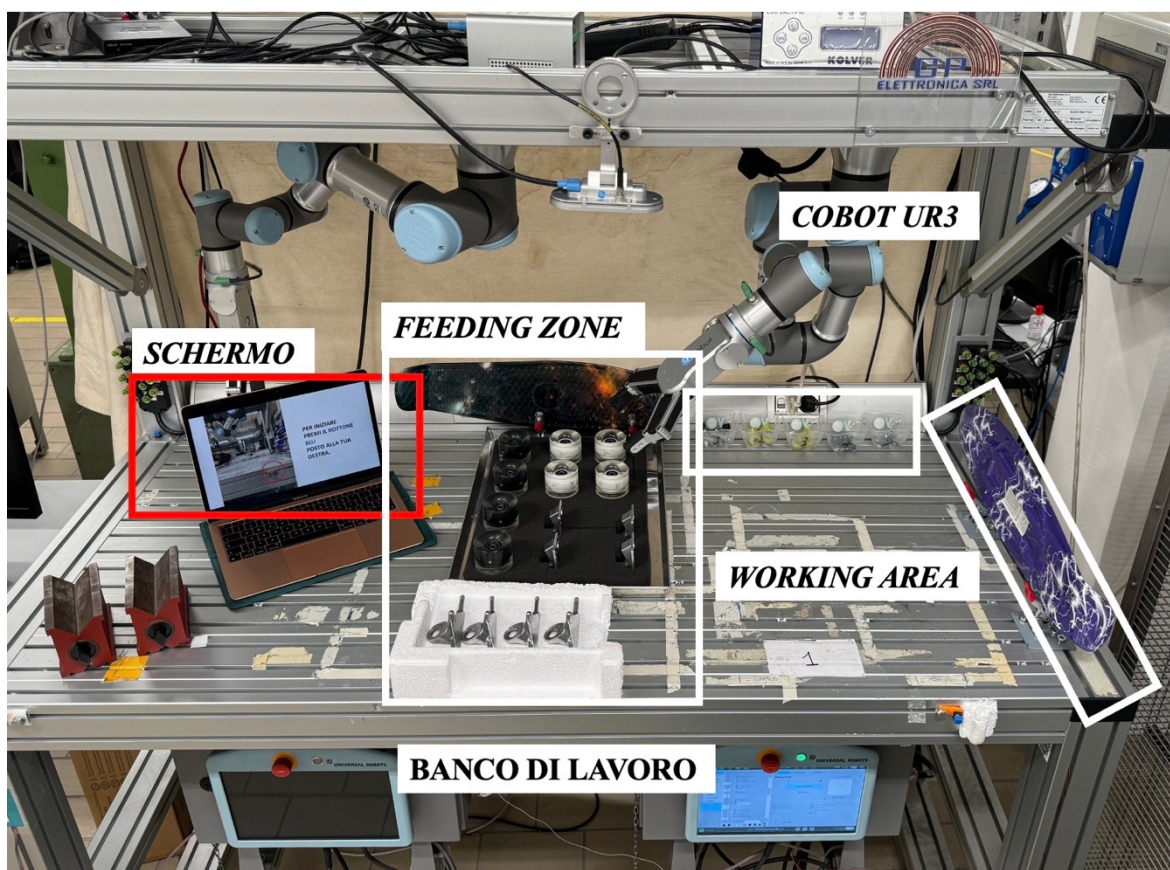


Figura 6.1 Schema della stazione di lavoro (Mind4Lab, Politecnico di Torino)

## 6.2. Metodologia e apparecchiature utilizzate

La progettazione e implementazione dell'esperimento ha richiesto l'utilizzo di vari dispositivi e strumenti forniti dal Mind4Lab e dal *team* di Qualità del DIGEP del Politecnico di Torino, la cui descrizione seguirà nelle seguenti sezioni.

### 6.2.1. Cobot UR3e

Per le condizioni di assemblaggio che hanno previsto la collaborazione *Human-Robot* si è fatto uso del Robot collaborativo UR3e (Figura 6.2), installato sul banco di lavoro. Tale cobot possiede un *payload* di 3 kg e una rotazione di 360° su tutti i giunti (compreso quello del polso).

Nel contesto dell'esperimento è installato sulla parte alta del banco di lavoro e svolge principalmente attività di *pick&place* e sostegno dei componenti in attività di avvitatura da parte del partecipante.



Figura 6.2 Cobot UR3e utilizzato nelle prove sperimentali (<https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/>)

La programmazione dei movimenti è avvenuta sfruttando il *teach pendant* (interfaccia di controllo portatile) e la modalità *free drive*, con la quale è stato possibile rimuovere i blocchi presenti nei giunti e spostare manualmente il braccio robotico fino al raggiungimento della posizione desiderata.

### 6.2.2. Tobii Pro Glasses 3

Il Tobii Pro Glasses 3 è un *eye-tracker* binoculare indossabile (Figura 6.3) con il quale sono stati acquisiti i dati sui comportamenti oculari dei partecipanti all'esperimento, al fine di catturare e visualizzare i loro processi cognitivi e di osservarne con precisione la percezione visiva.



Figura 6.3 Tobii Pro Glasses 3 utilizzati nelle prove sperimentali (<https://www.monash.edu/business/about-us/research-and-education-facilities/mdbl/our-facilities/hardware/tobii-eye-trackers>)

L'*eye-tracking* è un metodo a supporto dell'analisi dell'attenzione visiva. Nel contesto delle prove sperimentali ha permesso di determinare dove i partecipanti sono soliti posare lo sguardo e per quanto tempo, oltre a delineare il percorso dei movimenti oculari durante il periodo di osservazione. I movimenti oculari riflettono i processi cognitivi e lo stato emotivo del singolo, motivo per cui tale metodologia trova applicazione in diversi campi, tra cui la psicologia cognitiva, gli studi di *marketing* e le ricerche sull'interazione uomo-macchina.

Sebbene la visione umana appaia stabile quando si osserva un oggetto in maniera stabile, gli occhi compiono continuamente movimenti che contribuiscono a ricostruire l'immagine di ciò che stiamo guardando. Durante questo processo si possono distinguere due componenti: le fissazioni e le saccadi.



Le prime corrispondono a delle brevi pause, da 100 a 600 ms, che il movimento oculare compie su un'area specifica del campo visivo chiamata AOI (o “*Area of Interest*”).

Le fissazioni possono essere interpretate in modo diverso a seconda del contesto. Nella maggior parte dei casi, se un utente passa molto tempo ad osservare un'area specifica prima di compiere un'azione, ciò può essere indicativo di uno stato di confusione o stanchezza o di un grande interesse (Bergstrom & Shall, 2014).

Le seconde, invece, consistono in rapidi movimenti oculari che avvengono tra due fissazioni per far in modo che l'occhio componga come un *puzzle* la scena che sta osservando (Bergstrom & Shall, 2014).

In particolare, le fissazioni hanno luogo in quella che viene comunemente chiamata “visione foveale”, come mostrato in Figura 6.4, una componente di massimo 2 gradi al centro del campo visivo umano che si riferisce alla percezione visiva dettagliata e nitida degli oggetti. Il focus primario ricade in ciò che è incluso in quest'area, motivo per cui l'*eye-tracker* tiene traccia solo di ciò che viene registrato in quest'area (Bergstrom & Shall, 2014).



Figura 6.4 Foveal vision (Bergstrom et al., 2014)

I Tobii Pro Glasses 3 utilizzati si compongono di due lenti, ognuna delle quali possiede otto sensori di tracciamento oculare a tecnologia a Raggi Infrarossi (IR) (Figura 6.5): i raggi infrarossi emessi vengono riflessi dalla cornea e dalla pupilla, di modo che le telecamere

ocularari ad alta velocità (due su ogni lente) possano permettere il calcolo preciso della direzione dello sguardo.

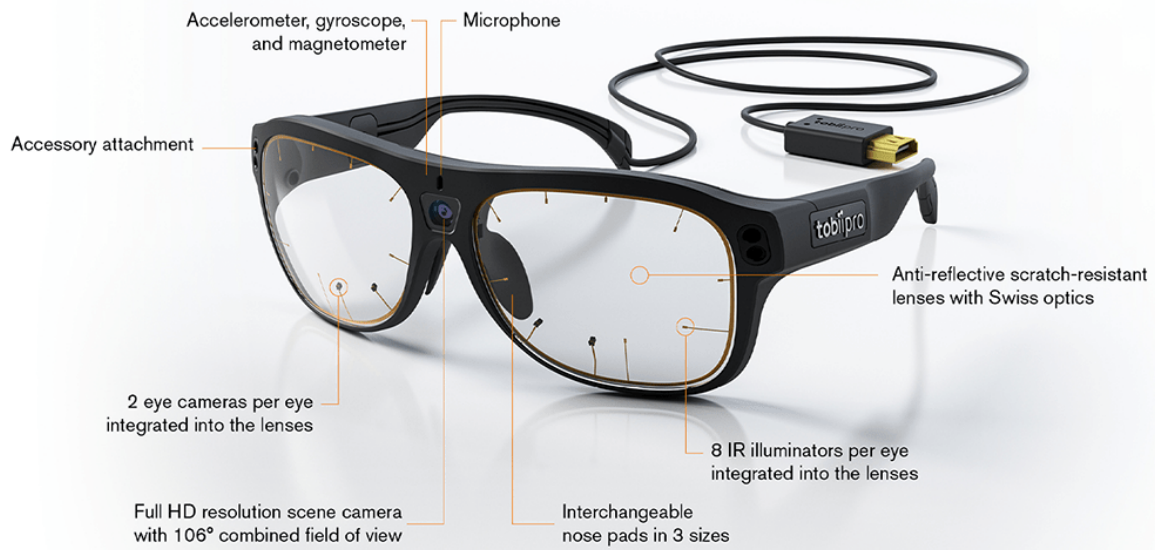


Figura 6.5 Specifiche tecniche dei Tobii Pro Glasses 3 (<https://www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/#>)

Durante l'intera durata dell'esperimento, il campo visivo dei partecipanti non è stato limitato dall'uso di questo dispositivo poiché sia i sensori che le telecamere sono integrate alle stesse lenti. La frequenza di campionamento arriva fino a 100 Hz: ciò ha consentito la raccolta di dati ad alta risoluzione temporale. In tal modo è stato possibile rilevare sia le fissazioni stabili che i movimenti saccadici dei partecipanti. I Tobii Pro Glasses 3 sono molto leggeri (circa 77 grammi): questo li rende poco invasivi e adatti ad un esperimento di lunga durata come questo in esame. Inoltre, data la loro ergonomia, è stato possibile indossarli anche con il dispositivo aR RealWear in alcune condizioni di assemblaggio presentate al partecipante. Non si sono riscontrati problemi nel contemporaneo utilizzo di entrambi gli strumenti (Figura 6.6).





*Figura 6.6 Foto di una partecipante che indossa Tobii Pro Glasses 3 con RealWear durante una condizione di assemblaggio proposta*

I Tobii Pro Glasses 3 sono dotati di batterie ricaricabili intercambiabili, ognuna delle quali permette un tempo di registrazione di 105 minuti. Ciò ha permesso l'uso degli occhiali per tutta la durata dell'esperimento senza che si incorresse in pericoli di spegnimento.

L'utilizzo di questo strumento è risultato fondamentale per estrarre dati sulle metriche di tracciamento oculare da correlare al carico cognitivo dei partecipanti. Nonostante le metriche risultanti dall'uso di questo dispositivo risultino molte di più di quelle elencate di seguito, si è deciso di utilizzare quelle ritenute rilevanti per le analisi da svolgere (Tabella 6.1). Le correlazioni tra le metriche e il carico cognitivo possono essere influenzate da fattori esterni e/o intrinseci agli utenti, come le caratteristiche oculari degli stessi o le condizioni di illuminazione in cui verte l'ambiente sperimentale. Per tale ordine di ragioni, le analisi che seguiranno nel capitolo successivo sono state svolte tenendo conto di possibili fonti di variazione.

Metriche	Descrizione	Correlazione con carico cognitivo	Letteratura a supporto
<i>Average whole fixation pupil diameter</i>	Analizza l'attenzione visiva e il carico cognitivo di un individuo mentre osserva un oggetto o un'area di interesse. Difatti la dilatazione della pupilla è una risposta autonoma del sistema nervoso simpatico che può fornire indicazioni sull'attenzione, l'interesse o le emozioni.	Positiva	(Bergstrom & Shall, 2014); (Beatty and Kahneman, 1966)
<i>Average duration of whole fixations</i>	Durata media delle fissazioni complete su una specifica area di interesse (AOI). È calcolato come l'intervallo di tempo tra il primo punto di fissazione dello sguardo e l'ultimo punto di fissazione dello sguardo appartenente ad una stessa fissazione.	Positiva	(Jacob and Karn, 2003); (Rayner, 1998)
<i>Number of whole fixations</i>	Numero totale di fissazioni su una specifica area di interesse (AOI)	Positiva	(Van Orden et al., 2001); (Goldberg and Kotval, 1999)
<i>Number of saccades</i>	Numero totale di saccadi registrate all'interno di una specifica area di interesse (AOI)	Positiva	(Guo et al., 2022)
<i>Average peak velocity of saccades</i>	Velocità massima media delle saccadi. La velocità è calcolata come i gradi dell'arco visivo percorsi durante la durata della saccade.	Positiva	(Bodala et al., 2014)
<i>Average amplitude of saccades</i>	Ampiezza media delle saccadi	Positiva	(Yang et al., 2014)

Tabella 6.1 Metriche di eye-tracking ritenute rilevanti per le analisi svolte

### 6.2.3. Empatica E4

Il braccialetto E4 di Empatica è stato utilizzato durante le prove sperimentali per ottenere i dati relativi alla *skin conductance*, chiamata anche “risposta galvanica della pelle” (GSR) o EDA (“*Electrodermal Activity*”). Quest’ultima rappresenta una misura dell'attività elettrica cutanea, la quale varia in relazione alla conduttanza della pelle. Essa viene comunemente utilizzata come indicatore dell'attivazione emotiva e dello *stress*, poiché è regolata dal sistema nervoso simpatico, che interviene in tali situazioni di eccitazione emotiva. Questo perché le mani hanno un'alta densità di ghiandole sudoripare che sono sensibili sia agli stimoli esterni (come la temperatura) sia agli stimoli interni (come le variazioni emotive). Tale metodo è largamente utilizzato per indagare lo stato emotivo di un utente ed è stato scelto per analizzare quello dei partecipanti all’esperienza in quanto non intrusivo per quest’ultimi.

L’ EDA è composta da una componente tonica ed una fasica, entrambe catturate dal dispositivo Empatica E4. La prima, chiamata anche “*Skin Conductance Level*” (o SCL), viene monitorata in un periodo di tempo prolungato ed in maniera continua, rappresentando un livello base di eccitazione dello stato emotivo.

L'attività fasica (nota anche come “*Skin Conductance Response*” o SCR), al contrario, risponde a stimoli specifici, come aumenti repentini del livello di sudorazione e quindi dei valori registrati (Bergstrom & Shall, 2014). È, quindi, una risposta più reattiva della componente tonica. Attraverso lo studio della componente fasica è stato possibile individuare dei picchi correlati all'insorgere di particolari eventi e reazioni del sistema simpatico successive ad un certo stimolo esterno. Il GSR è sensibile all'eccitazione emotiva, ragion per cui non è rappresentativa del tipo di emozione provata, bensì dell'intensità della stessa.



Figura 6.7 Empatica E4 e i sensori di cui si compone

L'Empatica E4 si compone di una serie di sensori in grado di rilevare vari indicatori biometrici con elevata precisione (Figura 6.7). Il sensore di conduttanza cutanea misura l'attività elettrodermica mentre il sensore di temperatura la temperatura cutanea. Inoltre, possiede un sensore di frequenza cardiaca capace di rilevarne la variabilità (HRV) utilizzando la fotopletoimografia. Infine, un accelerometro triassiale monitora i movimenti del polso, permettendo di distinguere gli stati di attività e riposo. Nel contesto dell'esperimento è stato uno strumento utile per comprendere lo stato psicofisico dei partecipanti, la loro risposta a stati di stress, stanchezza o a qualsiasi tipologia di eccitazione emotiva a cui sono stati esposti nel corso delle prove.

#### 6.2.4. RealWear Navigator 520

Il RealWear Navigator 520 (Figura 6.8) è un dispositivo indossabile progettato per supportare i lavoratori in prima linea in vari settori industriali e per vari scenari applicativi. Questo dispositivo fa parte della categoria degli *Head-Mounted Display* (HMD) (descritti nel Capitolo 5): un piccolo schermo montato davanti all'occhio dell'utente fornisce un'esperienza visiva simile a quella vissuta guardando uno schermo da 7 pollici a una distanza di 1 metro.

Questo dispositivo è stato utilizzato per mostrare le istruzioni ai partecipanti, i quali interagivano attraverso comandi vocali. Prima di iniziare l'esperimento sono state fornite spiegazioni base su come utilizzare lo strumento.



Figura 6.8 RealWear Navigator 520  
( <https://www.realwear.com/devices/navigator-520>)

È importante notare che il RealWear Navigator 520 è tecnicamente un dispositivo di Realtà Assistita (aR), ovvero sfrutta una tecnologia che non sovrappone elementi virtuali direttamente sull'ambiente fisico dell'utente in maniera invasiva ma proietta su un *display* le informazioni di cui necessita (Figura 6.9). Le istruzioni somministrate ai partecipanti figurano direttamente nel loro campo visivo: non vi è una sostituzione della realtà ma una

sovrapposizione ad essa di elementi virtuali che si integrano armoniosamente con il mondo tangibile. La semplicità d'uso, così come l'ergonomia e la leggerezza del dispositivo, risultano essere i punti di forza dell'aR. La Realtà Assistita è utilizzata in svariati scenari applicativi, come l'assistenza, l'ispezione e la manutenzione.

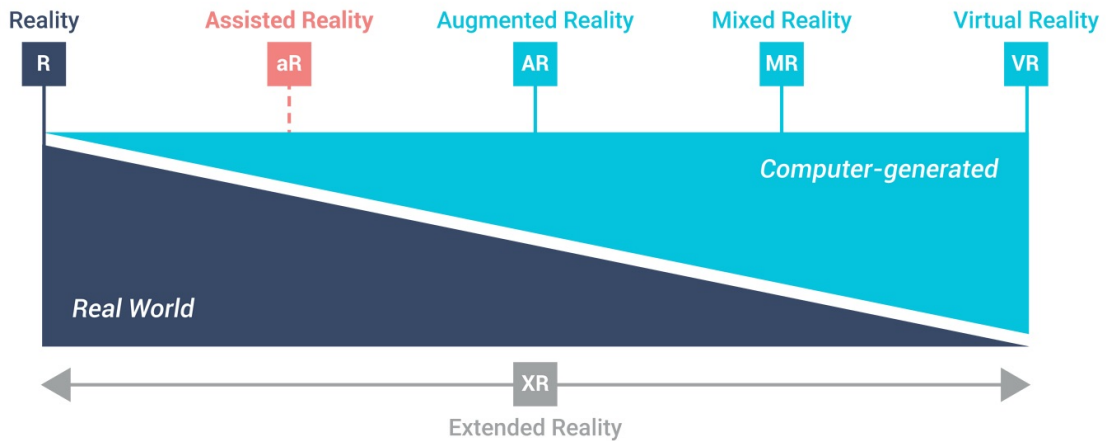


Figura 6.9 Tecnologie di Realtà Estesa. La Realtà Assistita (aR) mostra le informazioni senza alterare la percezione del mondo reale (<https://blog.amaxperteye.com/what-is-assisted-reality-here-is-what-you-need-to-know>)

Nei capitoli relativi all'esperimento, quando si parla dell'uso dei RealWear ci si riferisce come dispositivi "aR".



### 6.2.5. Computer portatile (schermo)

Durante l'intero esperimento, il computer portatile è stato considerato alla pari di uno schermo (comunemente situato all'interno delle postazioni di lavoro delle linee produttive) e utilizzato per il consulto delle istruzioni di assemblaggio. La posizione dello schermo è stata mantenuta costante durante le prove, posizionandolo alla sinistra del partecipante, adiacente al vassoio contenente parte dei componenti (Figura 6.10). Questo accorgimento ha permesso un'analisi accurata dei dati relativi ai movimenti oculari dei partecipanti in questa specifica area.



*Figura 6.10 Setup dell'esperimento. Da come si può vedere il computer mostra le istruzioni ed è posizionato all'estrema sinistra del banco di lavoro, in modo tale da non risultare di impedimento ai partecipanti per il corretto svolgimento dei tasks e da non ostacolare il movimento del cobot.*

Nelle configurazioni che lo prevedono, il PC mostra le istruzioni ai partecipanti. Quest'ultimi interagiscono con esso attraverso le frecce "avanti" ed "indietro" della tastiera.

Il computer è stato, inoltre, utilizzato per la compilazione dei questionari da parte dei partecipanti.

### 6.2.6. Istruzioni

Nella progettazione delle istruzioni da corredare all'assemblaggio, è stato fondamentale determinare quali informazioni fornire ai partecipanti affinché potessero svolgere il proprio compito senza essere sovraccaricati mentalmente da dettagli superflui. Le istruzioni presentate seguono la logica delineata da Laviola et al. (2024), secondo cui la sequenza delle informazioni presentate deve rispettare l'ordine logico con cui gli operatori le richiedono per comprendere appieno l'assemblaggio da svolgere (indipendentemente dalle loro capacità cognitive). Le istruzioni costruite, quindi, seguono tale ordine:

1. **Ubicazione:** L'operatore deve innanzitutto conoscere la zona dell'attrezzatura in cui il/i componente/i dovrà essere assemblato;
2. **Identità:** L'operatore deve sapere quale/i componente/i deve/devono essere assemblato/i tra tutti quelli disponibili nell'area di lavoro;
3. **Ordine:** È necessario stabilire la sequenza di montaggio dei componenti;
4. **Orientamento:** L'operatore deve comprendere il corretto orientamento del/i componente/i da assemblare;
5. **Modo:** L'operatore deve capire come assemblare il/i componente/i;
6. **Notifica:** L'operatore ha bisogno di ricevere una conferma che il/i componente/i è/sono stato/i montato/i correttamente.

Per quanto riguarda le informazioni di notifica, bisognerebbe avere in dotazione dei sensori che riconoscano la corretta esecuzione dell'assemblaggio. Tuttavia, nel presente esperimento, è l'operatore che verifica se quanto assemblato corrisponda all'immagine del montaggio corretto presentata tramite istruzione.

Quando gli operatori non hanno conoscenza pregressa dell'attrezzatura e delle attività di assemblaggio proposte, l'*affordance* percepita dell'oggetto è molto bassa. Nessuno dei partecipanti all'esperimento ha mai montato uno skateboard né ha mai interagito con i dispositivi proposti, motivo per cui l'approccio generale ad inizio esperimento è stato caratterizzato da un'accurata lettura delle istruzioni prima di intraprendere qualsiasi azione.

Questa modalità, detta "lettura lineare", è tipica degli utenti prudenti o principianti (Ganier, 2004). Con il progredire delle prove, la consultazione delle istruzioni diminuisce e avviene

solo quando necessario, per risolvere dubbi specifici durante l'assemblaggio. Questa modalità è definita “*task-based*” (Ganier, 2004). Le istruzioni sono state strutturate per adattarsi a entrambe le strategie di interazione. Così, il partecipante ha avuto modo di navigare tra le istruzioni alla ricerca solo di quelle di cui bisogna.

È stato, inoltre, osservato che i partecipanti tendono ad esaminare dapprima le immagini e i video contenuti nelle istruzioni, per poi passare alla lettura del testo che le accompagna.

In sintesi, i comportamenti riscontrati nei partecipanti durante le prove di assemblaggio compiute sono in linea con quanto discusso da J. R. Anderson (1983): l'acquisizione delle competenze necessarie al corretto assemblaggio può essere diviso in tre fasi. Inizialmente, i partecipanti seguono le istruzioni in modo rigoroso. Successivamente, nella “fase associativa”, l'operatore acquisisce maggiore chiarezza sul compito, riducendo l'uso delle istruzioni. Tuttavia, in questa fase si registrano errori nell'assemblaggio, come la scelta errata dei pezzi o il loro montaggio scorretto, che vengono corretti durante le prove. Infine, nella “fase autonoma”, i partecipanti, avendo acquisito le competenze necessarie e interiorizzato le informazioni corrette, mostrano tempi di assemblaggio più rapidi e un numero di errori tendente allo zero.

Le istruzioni non cambiano in virtù dei dispositivi che le erogano, sia che la configurazione preveda lo schermo sia che vengano presentate con la Realtà Assistita. Al contrario, se a cambiare è la modalità di assemblaggio (manuale o con cobot) le istruzioni delineeranno per ognuno dei casi una data sequenza di azioni. Ad esempio, se guardiamo la Figura 6.11, questa rappresenta, la prima istruzione presentata al partecipante nella condizione di assemblaggio con il cobot. Se, invece, l'assemblaggio è manuale, la prima attività che il partecipante deve svolgere risulta quella in Figura 6.12.





**INSERISCI IL  
BULLONE NEL  
FORO CENTRALE  
DEL BASEPLATE**

*Figura 6.11 Esempio di istruzione mostrata ai partecipanti all'inizio della prova di assemblaggio nella condizione che prevede l'utilizzo del cobot. Il robot collaborativo ha compiuto una precedente attività di pick del componente e il partecipante come prima attività deve inserire il bullone nel foro*



**PRENDI IL BASEPLATE  
E POSIZIONALO SUL  
BANCO DI LAVORO.**

*Figura 6.12 Esempio di istruzione mostrata ai partecipanti all'inizio della prova di assemblaggio nella condizione manuale. In tal caso, è lo stesso operatore a compiere l'attività di pick&place del componente come prima attività*

### 6.3. Descrizione esperimento

L'esperimento è stato progettato e somministrato all'interno del Mind4Lab del Politecnico di Torino. L'assemblaggio dello skateboard è proposto ai partecipanti in quattro diverse configurazioni, ciascuna delle quali è stata eseguita da ogni singolo partecipante.

- Cobot – Schermo (durante l'esperimento e l'analisi dei dati che seguirà verrà indicato come "C-S"): ai partecipanti è stato chiesto di assemblare lo skateboard avvalendosi del supporto di un cobot. Le istruzioni di montaggio sono state presentate al partecipante attraverso uno schermo.
- Cobot – aR (durante l'esperimento e l'analisi dei dati che seguirà verrà indicato come "C-aR"): ai partecipanti è stato chiesto di assemblare lo skateboard avvalendosi del supporto di un cobot. Le istruzioni di montaggio sono state presentate al partecipante attraverso gli occhiali aR RealWear.
- Manuale – Schermo (durante l'esperimento e l'analisi dei dati che seguirà verrà indicato come "M-S"): ai partecipanti è stato chiesto di assemblare lo skateboard basandosi unicamente sulla loro forza lavoro e la loro manualità. Le istruzioni di montaggio sono state presentate al partecipante attraverso uno schermo.
- Manuale – aR (durante l'esperimento e l'analisi dei dati che seguirà verrà indicato come "M-aR"): ai partecipanti è stato chiesto di assemblare lo skateboard basandosi unicamente sulla loro forza lavoro e la loro manualità. Le istruzioni di montaggio sono state presentate al partecipante attraverso gli occhiali aR RealWear.

L'esperimento per ogni partecipante comprende 12 prove di assemblaggio. Ogni partecipante esegue tre assemblaggi consecutivi per ciascuna configurazione proposta. La scelta di far compiere tre assemblaggi per ogni configurazione è motivata dalla volontà di catturare l'evoluzione dei comportamenti dei partecipanti e il loro approccio al sistema, evitando di ottenere dati influenzati solo dall'effetto novità della prima esperienza. In aggiunta, l'ordine con cui le configurazioni sono state proposte è casuale per mitigare l'effetto ordine ed evitare che i risultati subiscano influenze dalla sequenza delle prove.

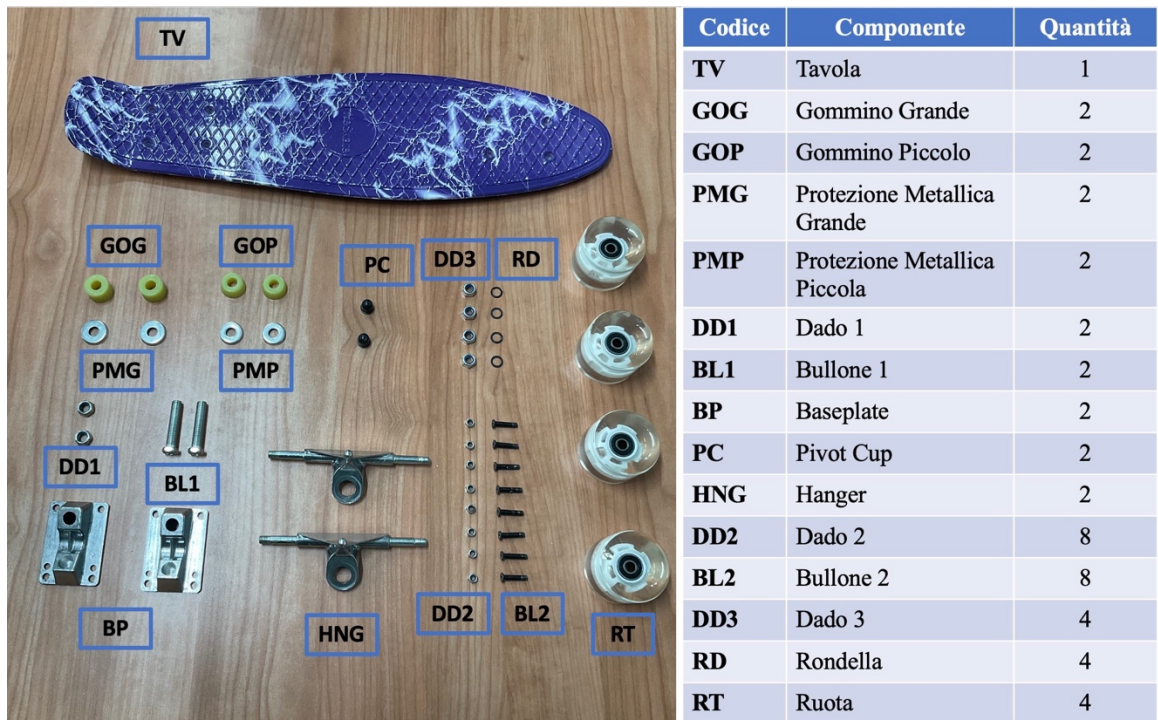


Figura 6.13 BoM dello skateboard da assemblare

Tabella 6.2 Elenco componenti skateboard

Lo skateboard è stato scelto come oggetto di assemblaggio (in Figura 6.13 la sua BoM) in quanto composto da parti facilmente intercambiabili (come ruote, assi e tavola) la cui modularità permette di creare varie configurazioni di assemblaggio, utili per testare diverse combinazioni e complessità operative (Tabella 6.2). Difatti, lo skateboard da assemblare varia nel colore delle ruote (bianche o nere) e nella loro disposizione sugli assi, così come nel colore della tavola (viola o nera) come è visibile in Figura 6.14.



Figura 6.14 Componenti variabili dello skateboard da assemblare

In totale sono dieci le combinazioni scelte con cui si presenta lo skateboard assemblato. È in questo modo che non solo le tre prove facenti parte della stessa configurazione ma anche l'ultima prova di una configurazione e la prima di quella successiva non risultino uguali l'una all'altra. In questo modo, ogni prova di assemblaggio ha come risultato uno skateboard diverso in termini di colore delle tavole o disposizione e colore delle ruote (Tabella 6.3 e Tabella 6.4). Questa variabilità fa in modo che l'effetto apprendimento dei partecipanti non influenzi i risultati, fornendo dati più robusti, oltre che utile a testare la flessibilità e l'adattabilità del cobot.



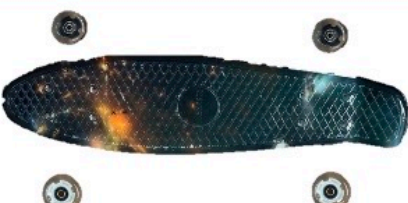


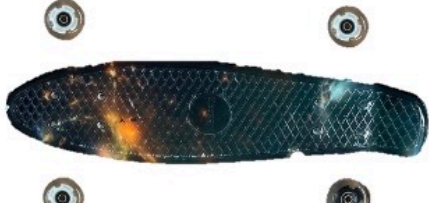
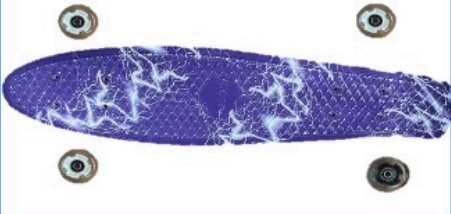
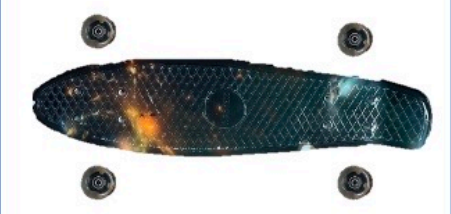

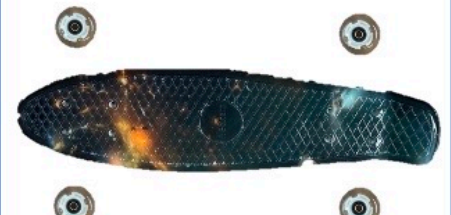


Condizione assemblaggio	N.ro combinazione	Caratteristiche skateboard
<b>C-aR</b>	1	
	3	
	10	
<b>C-S</b>	6	
	5	
	7	

Tabella 6.3 Elenco delle combinazioni delle componenti variabili dello skateboard per le configurazioni C-aR e C-S con corrispondenti rappresentazioni. Come si può vedere ogni configurazione prevede tre prove e né all'interno delle stesse configurazioni né tra le configurazioni si ripetono le stesse combinazioni



<b>M-aR</b>	2	
	9	
	4	
<b>M-S</b>	8	
	7	
	3	

*Tabella 6.4 Elenco delle combinazioni delle componenti variabili dello skateboard per le configurazioni M-aR e M-S con corrispondenti rappresentazioni. Come si può vedere ogni configurazione prevede tre prove e né all'interno delle stesse configurazioni né tra le configurazioni si ripetono le stesse combinazioni*

In Tabella 6.5 è presentato l'ordine seguito (durante l'esperimento) per le prove di assemblaggio di ogni partecipante. Si è eseguita una randomizzazione dell'ordine delle quattro condizioni proposte: ogni condizione è stata presentata in tutte le posizioni possibili (prima, seconda, terza, quarta) nell'ordine di esecuzione. Questa scelta è stata attuata per eliminare l'effetto ordine di presentazione delle condizioni sui risultati ottenuti. Utilizzando questa metodologia, i risultati di una certa condizione non sono stati influenzati dal fatto che quella condizione sia stata eseguita per prima o ultima. Questo approccio garantisce che i risultati dipendano dalle stesse condizioni e non dall'ordine con cui sono state proposte ai partecipanti durante l'esperimento. I dodici partecipanti sono stati divisi in quattro gruppi da tre componenti ognuno.

<b>Gruppo partecipanti</b>	<b>Partecipante</b>	<b>Sequenza condizioni</b>
1	1	C-aR
	5	C-S
	12	M-aR M-S
2	4	M-S
	8	C-aR
	11	M-aR C-S
3	3	M-aR
	7	M-S
	10	C-S C-aR
4	2	C-S
	6	M-aR
	9	C-aR M-S

*Tabella 6.5 Sono stati creati quattro gruppi corrispondenti ad una data sequenza di condizioni che viene seguita durante lo svolgimento dell'esperimento. Ad ogni gruppo sono associati tre partecipanti.*

Assemblare uno skateboard equivale a replicare operazioni meccaniche precise e ripetibili, ideali per analizzare l'efficienza dell'assemblaggio. Le dimensioni e il peso della componentistica si adatta alla manipolazione sia da parte degli operatori che da parte del cobot senza che sia richiesta un'attrezzatura particolare.

La durata totale dell'esperimento per ogni partecipante è stata di tre ore e mezzo. Questo tempo include non solo i dodici assemblaggi, ma anche la preparazione del partecipante

prima dell'inizio dell'esperimento, la somministrazione di tre questionari di valutazione soggettiva dopo ogni prova compiuta e la preparazione del *setup* tra le prove (Figura 6.15).

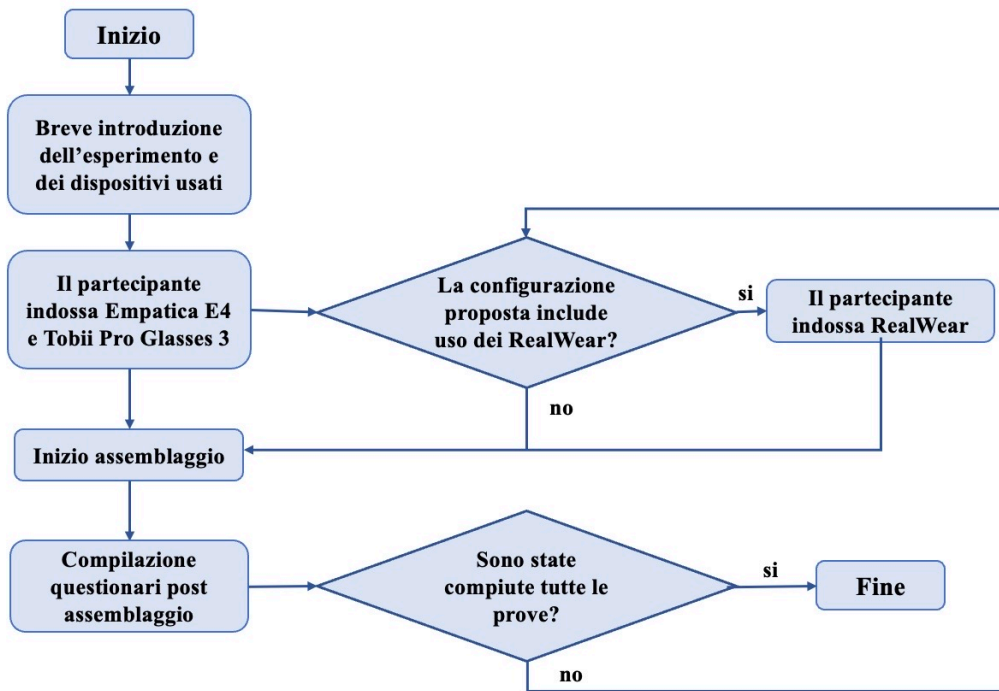


Figura 6.15 Flowchart della sequenza di attività per ciascun partecipante

Poiché nella Tesi sono state considerate due tipologie differenti di assemblaggio (una che prevede il cobot a supporto e uno totalmente manuale) anche la sequenza di attività finalizzate all'assemblaggio dello skateboard cambiano. Quando l'assemblaggio è assistito dal cobot, l'operatore segue una serie specifica di *steps* ad esso coordinati, lasciando al robot collaborativo attività che riguardano nella maggior parte dei casi attività di presa e sostegno. Al contrario, quando l'assemblaggio è solo in capo al partecipante, quest'ultimo deve gestire autonomamente la presa, il posizionamento e il fissaggio dei componenti.

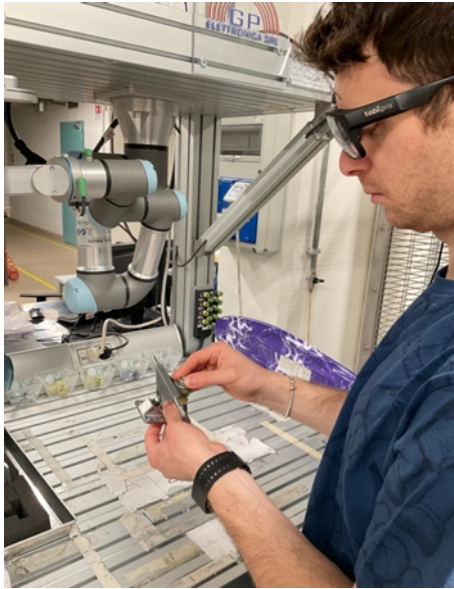
Di seguito, è presentata la sequenza di *steps* per assemblare lo skateboard manualmente. Il partecipante visiona le istruzioni (siano esse mostrate su schermo o presentate tramite RealWear) per conoscere i *tasks* da compiere:

- 1) Il partecipante si posiziona davanti al tavolo di lavoro. Prende il *baseplate* (BP) e lo posiziona sul banco di lavoro, assicurandosi che sia orientato nel modo corretto.



- 2) Il partecipante inserisce il bullone (BL1) nel foro centrale del *baseplate* (BP), assicurandosi che la parte filettata del bullone sia rivolta verso l'alto.
- 3) Il partecipante monta prima la protezione metallica più grande (PMG) e poi il gommino giallo più grande (GOG) sul bullone (BL1), assicurandosi che sia il gommino che la protezione metallica siano montati nel modo corretto.
- 4) Il partecipante assembla il *pivot cup* nero (PC) e l'hanger (HNG) e monta tale insieme assemblato sul *baseplate*.
- 5) Il partecipante monta prima il gommino giallo più piccolo (GOP) e poi la protezione metallica più piccola (PMP) sul bullone (BL1), assicurandosi che sia il gommino che la protezione metallica siano montati nel modo corretto (la base minore del gommino piccolo deve essere rivolta verso l'alto).
- 6) Il partecipante avvita il dado (DD1) sul bullone, spingendo la testa del bullone durante l'avvitatura (Figura 6.16.a).
- 7) Il partecipante ripone il semi assemblato 1 (chiamato "*Truck 1*") fuori dall'area di lavoro.
- 8) Il partecipante ripete gli *steps* 1-7 per assemblare il semi assemblato 2 (o "*Truck 2*").
- 9) Il partecipante prende le basi e le posiziona sul piano di lavoro nelle aree contrassegnate con "1" e "2".
- 10) Il partecipante posiziona la tavola (TV) sulle basi in modo che il *nose* della tavola (la parte più larga e appuntita) fuoriesca dal banco di lavoro per permettere il montaggio delle parti successive (Figura 6.16.b). In questa fase deve prestare attenzione a quale tavola prendere (viola o nera).
- 11) Il partecipante posiziona il semi assemblato 1 sul *nose* della tavola, assicurandosi che ci sia corrispondenza tra i fori del *baseplate* (BP) e quelli della tavola (TV).
- 12) Il partecipante inserisce nei quattro fori i bulloni (BL2) e li serra con i dadi (DD2) (Figura 6.16.c) .
- 13) Il partecipante ruota la tavola (TV), facendo ora fuoriuscire il *tail* (l'estremità della tavola più squadrata) dal banco di lavoro per permettere il montaggio delle parti successive.

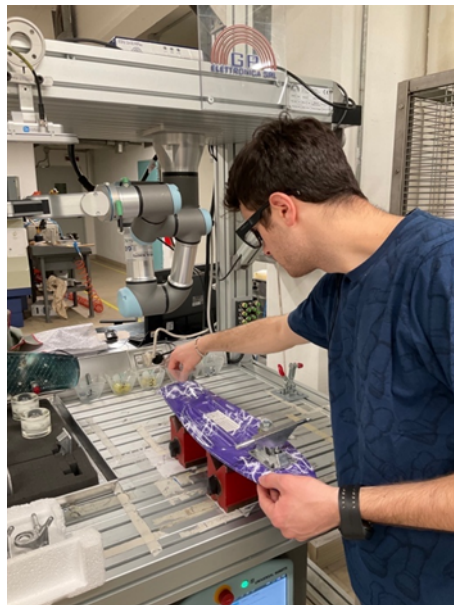
- 14) Il partecipante posiziona il semi assemblato 2 sul *tail* della tavola, assicurandosi che ci sia corrispondenza tra i fori del baseplate (BP) e quelli della tavola (TV).
- 15) Il partecipante inserisce nei quattro fori i bulloni (BL2) e li serra con i dadi (DD2).
- 16) Il partecipante, facendo attenzione al colore della ruota indicato nelle istruzioni, prende la ruota (RT) e la monta sull'asse indicato dalle istruzioni, facendo in modo che la superficie esterna risulti sempre quella liscia.
- 17) Il partecipante inserisce la rondella (RD) e avvita il dado (DD3) (Figura 6.16.d).
- 18) Il partecipante ripete i *tasks* 16-17 per montare le altre tre ruote sugli assi corretti.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.16 Figura (a) Il partecipante avvita il dado (DD1) sul bullone, spingendo il bullone durante l'avvitatura (b) Il partecipante posiziona la tavola (TV) sulle basi in modo che il nose della tavola fuoriesca dal banco di lavoro. (c) Il partecipante preleva il bullone (BL2) nell'apposito box per poi inserirlo nel foro. (d) Il partecipante avvita il dado (DD3) dopo aver montato la ruota (RT)

Quella ora presentata è la sequenza di *steps* che portano all'assemblaggio dello skateboard nel caso di assemblaggio con il cobot. Il partecipante visiona le istruzioni (siano esse mostrate su schermo o presentate tramite RealWear) per conoscere i *tasks* da compiere:

- 1) Il partecipante si posiziona davanti al banco di lavoro. Per dare inizio all'assemblaggio preme il bottone blu posto alla sua destra che dà l'input di movimento al cobot.
- 2) Il cobot prende il *baseplate* (BP) nel vassoio e lo posiziona davanti all'operatore.
- 3) Il partecipante inserisce il bullone (BL1) nel foro centrale del *baseplate* (BP), sorretto al contempo dal cobot. Il partecipante si assicura che la parte filettata del bullone abbia il giusto orientamento prima di montare le parti successive.
- 4) Il partecipante monta prima la protezione metallica grande (PMG) e poi il gommino grande (GOG) sul bullone, mentre il cobot sostiene la struttura sottostante.
- 5) Il partecipante assembla il *pivot cup* nero (PC) all'*hanger* (HNG) e lo monta sul *baseplate* (BP), mentre il cobot sostiene la struttura. Poiché l'*hanger* è pesante, il partecipante deve mantenere con il dito il bullone (BL1) durante l'assemblaggio.
- 6) Il partecipante monta prima il gommino piccolo (GOP) e poi la protezione metallica piccola (PMP) sul bullone (BL1), mantenendo i componenti serrati tra loro. Il cobot continua a svolgere attività di supporto della struttura.
- 7) Il partecipante inserisce il dado (DD1) sul bullone (BL1) e lo avvita, spingendo la testa del bullone verso l'alto.
- 8) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 9) Il cobot poggia il semi assemblato 1 (o "*Truck 1*") sul banco di lavoro.
- 10) Il partecipante ripone il semi assemblato 1 (o "*Truck 1*") fuori dall'area di lavoro.
- 11) Si ripetono i *tasks* 1-10 per assemblare il semi assemblato 2 ("*Truck 2*").
- 12) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 13) Il cobot prende la tavola (TV) del colore esatto per quella data prova e la posiziona davanti all'operatore, con il *tail* della tavola rivolta verso il partecipante.
- 14) L'operatore posiziona il semi assemblato 1 delle fasi precedenti sul *tail* della tavola (TV), assicurandosi che ci sia corrispondenza tra i fori del *baseplate* (BP) e quelli della tavola. Il cobot continua a svolgere attività di supporto della tavola.
- 15) Il partecipante inserisce nei quattro fori i bulloni (BL2) e li serra con i dadi (DD2) mentre il cobot continua a svolgere attività di supporto della tavola.

- 16) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 17) Il cobot ruota la tavola (TV) e posiziona il *nose* della tavola davanti all'operatore.
- 18) L'operatore posiziona il semi assemblato 2 delle fasi precedenti sul *nose* della tavola (TV), assicurandosi che ci sia corrispondenza tra i fori del *baseplate* (BP) e quelli della tavola. Il cobot continua a svolgere attività di supporto della tavola.
- 19) Il partecipante inserisce nei quattro fori i bulloni (BL2) e li serra con i dadi (DD2) mentre il cobot continua a svolgere attività di supporto della tavola.
- 20) Il partecipante prende le basi e le posiziona sul piano di lavoro nelle aree contrassegnate con "A" e "B".
- 21) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 22) Il cobot posiziona la tavola sulle basi.
- 23) Il cobot prende la ruota (RT) corretta dal vassoio e la posiziona accanto all'asse dove deve essere montata.
- 24) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 25) Il cobot rilascia la ruota (RT) nel palmo del partecipante.
- 26) Il partecipante monta la ruota sull'asse ed inserisce la rondella (RD) e poi avvita il dado (DD3).
- 27) Il partecipante preme il bottone blu posto alla sua destra per dare input di movimento al cobot.
- 28) Si ripetono i *tasks* 23-27 per il montaggio delle rimanenti tre ruote (RT)

In Tabella 6.6 è riportato l'elenco dei tasks elementari sopracitati con annessa allocazione dei compiti tra i due agenti: il partecipante e il cobot.

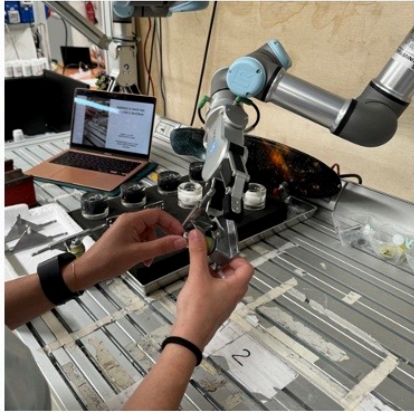

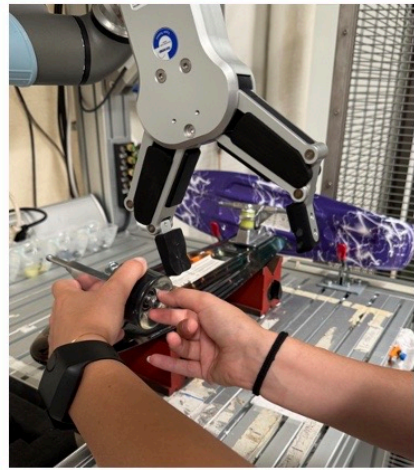
Task elementare	HRC task allocation		Macro task	Figura
	Human	Robot		
Pick BP		X	Montaggio semiassemblato (Truck)	
Inserimento BL1 nel foro centrale del BP	X			
Pick PMG e GOG	X			
Montaggio PMG e GOG su BL1	X			
Assemblaggio PC e HNG	X			
Montaggio HNG assemblato su BP	X			
Pick PMP e GOP	X			
Montaggio GOP e PMP su BL1	X			
Avvitatura DD1 su BL1	X			
Place semiassemblato (Truck) fuori area di lavoro	X			
Pick TV		X	Montaggio semiassemblato su TV	
Place Truck su tail della TV	X			
Inserimento BL2 nei fori del BP	X			
Avvitatura DD2 su BL2	X			
Rotazione TV		X		
Pick & Place basi su piano di lavoro	X		Montaggio RT	
Place TV sulle basi		X		
Pick RT		X		
Montaggio RT su asse	X			
Inserimento RD	X			
Avvitatura DD3 su asse	X			

Tabella 6.6 HRC task allocation

## 7. ANALISI DEI DATI RACCOLTI

### 7.1. Metodologia e analisi

I dati analizzati in questo studio forniscono una visione complessiva del carico cognitivo a cui sono esposti i partecipanti e come essi stessi valutano le condizioni di assemblaggio proposte loro. La prima fonte di dati è rappresentata dall'Empatica E4, da cui sono stati estratti i dati relativi alla risposta galvanica della pelle dei partecipanti. Vi sono, poi, i dati provenienti dalle metriche oculari dei Tobii Pro Glasses 3 e quelli provenienti dalla somministrazione dei questionari (NASA-TLX, SUS e SAM), dai quali possono essere ottenute le percezioni dei partecipanti in merito al sistema sperimentato. Infine, attraverso gli errori commessi dai partecipanti e dal cobot, si valuta la performance, collegata strettamente ai concetti di carico cognitivo e di usabilità del sistema. L'integrazione dell'intero insieme di dati ha consentito lo sviluppo di un'analisi multidimensionale con lo scopo di confrontare i risultati provenienti da dati fisiologici oggettivi, percezioni soggettive ed evidenze sulle performance svolte.

La maggior parte dei dati, prima di essere analizzati, hanno subito un *pre-processing*. Dapprima, si è provveduto a scaricare quelli provenienti dall'Empatica E4 attraverso l'applicazione E4 Manager fornita dalla stessa azienda: il risultato è stato l'ottenimento di file in formato Zip. Ogni file è associato ad un parametro fisiologico misurato dal dispositivo. Il parametro scelto come oggetto di analisi è l'EDA, ulteriormente elaborato e decomposto in due componenti: la *Skin Conductance Level* (SCL) e la *Skin Conductance Response* (SCR). Durante questo processo, il segnale è stato normalizzato e filtrato.

Le sessioni video, registrate attraverso i Tobii Pro Glasses 3, sono state processate ed analizzate attraverso l'applicazione "Tobii Pro Lab", fornita dalla stessa azienda (Figura 7.1).



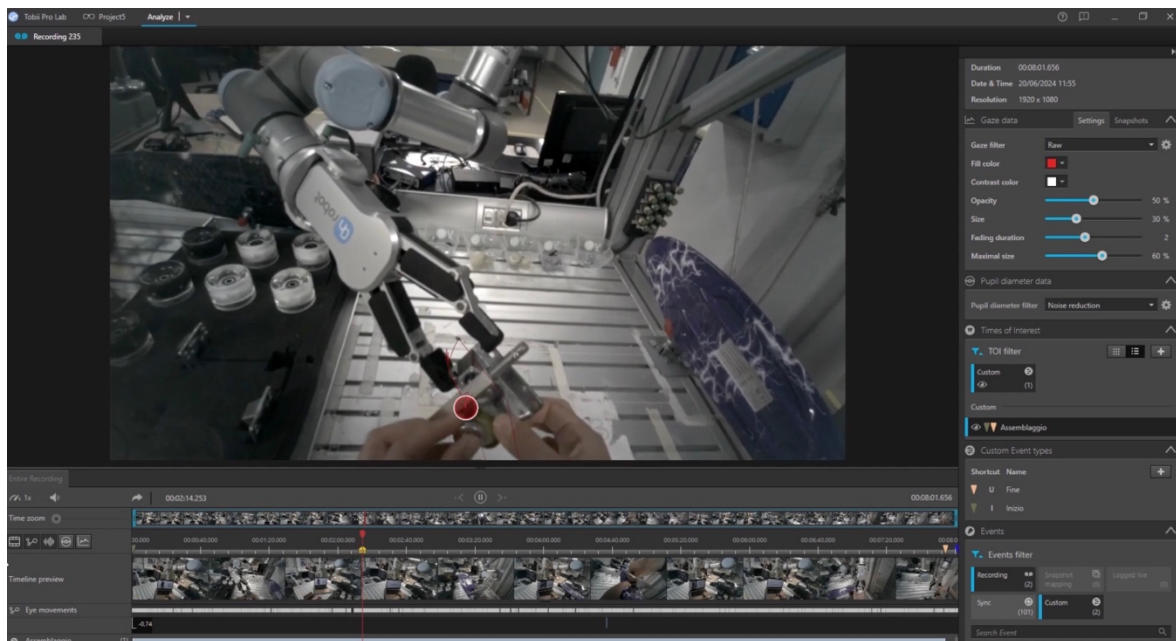


Figura 7.1 Schermata dell'applicazione "Tobii Pro Lab" con cui sono stati processati i video dell'eye-tracking. Ogni video è stato accuratamente esaminato con il fine di identificare e selezionare le regioni temporali di interesse (o TOI) contenenti le informazioni rilevanti per le analisi. Al termine di questa fase, sono poi state esportate le metriche rilevanti per le analisi. Durante la stessa esportazione si sono ottenuti valori aggregati per ogni metrica contenuta in quel dato TOI.

Per i dati provenienti dai questionari, così come quelli degli errori, non sono state compiute rielaborazioni tali da essere riportate in questa sezione.

## 7.2. Analisi dei dati e risultati dell'indagine sul carico cognitivo

Indagare sul *mental workload* e comprendere quali attività o condizioni portano il partecipante ad una situazione di maggiore *stress* e carico cognitivo aiuta sicuramente a comprendere l'effettivo utilizzo delle condizioni di assemblaggio proposte all'interno di un'ambiente di lavoro reale. Allo stesso modo, analizzare come i partecipanti reputino il sistema di assemblaggio proposto risulta importante se si vogliono migliorare aspetti come l'efficienza.

### 7.2.1. Misure oggettive

Seguiranno in questa sezione diverse analisi sui risultati ottenuti dalle metriche di *eye-tracking* e di EDA selezionate, al fine di comprendere in maniera più approfondita le reazioni cognitive e mentali dei partecipanti durante le interazioni con i diversi sistemi loro proposti.



### Durata assemblaggio

Prima dell'analisi di tale metrica, è stato oggetto di discussione la fonte da cui estrapolarne i dati. Si è scelto che il dispositivo migliore per la causa fosse l'Empatica E4. La motivazione di tale scelta risiede nella precisione del dato ricevuto: ogni partecipante, durante l'esperimento, utilizza il *tag button* dell'Empatica E4 per segnare l'inizio e la fine dell'assemblaggio. L'intervallo di tempo che ne risulta è stato ritenuto più accurato rispetto a quello ottenibile dai Tobii Pro Glasses 3. In aggiunta, l'unità di misura scelta per l'analisi di tale metrica è il secondo (s), in quanto attraverso tale granularità del dato possono essere catturate più facilmente potenziali variazioni significative e dinamiche interessanti all'analisi da svolgere.

Per questa analisi, così come per quelle che seguiranno, si è scelto l'uso dei *boxplot* come diagramma rappresentativo dei dati. Questi ultimi sono grafici attraverso cui è possibile rappresentare una distribuzione dei dati, fornendo informazioni sulla loro mediana, sui loro quartili (Q1 e Q3) e *outlier*, oltre che sulla simmetria e la variabilità della distribuzione di dati stessa. Il motivo per il quale sono stati scelti risiede nella rappresentazione compatta e facilmente interpretabile che riescono a fornire, permettendo l'identificazione immediata degli *outlier*. Inoltre, facilitano la comparazione tra le varie condizioni sperimentali proposte ai partecipanti, mostrando chiaramente le differenze esistenti tra le stesse.

I boxplot rappresentati in Figura 7.2 confrontano i tempi di assemblaggio registrati dai partecipanti nelle varie condizioni proposte loro.

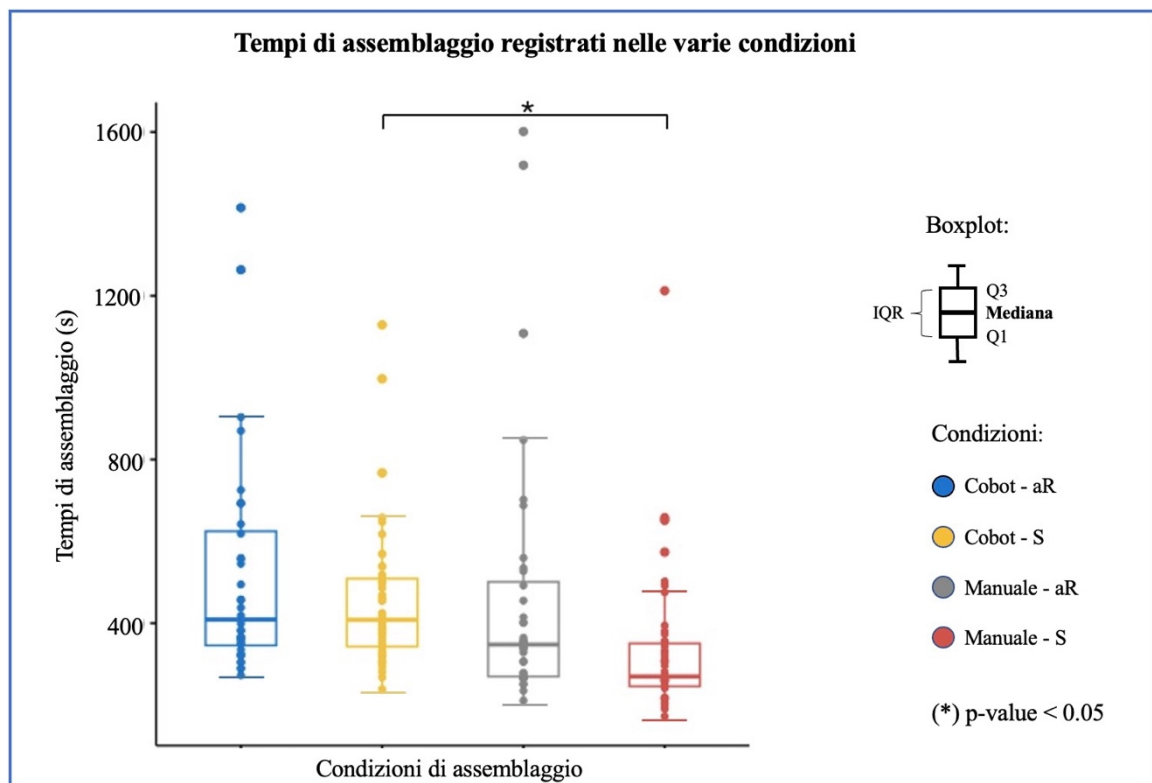


Figura 7.2 Confronto tra boxplot dei tempi di assemblaggio registrati dai partecipanti nelle varie condizioni di assemblaggio

Da quanto si può notare, la condizione “C-aR” (assemblaggio con il cobot e istruzioni presentate attraverso il dispositivo aR) mostra una variabilità significativa dei tempi di assemblaggio (IQR più ampio), seguita dalla condizione “M-aR” (assemblaggio manuale con istruzioni aR). In questa metrica, quindi, si riscontra una maggiore variabilità del set di dati nelle condizioni che somministrano le istruzioni attraverso i RealWear, sia che l’assemblaggio sia svolto manualmente sia in collaborazione con il cobot. Questo può significare che, seppur alcuni partecipanti abbiano trovato più facile ed intuitivo questo tipo di istruzioni, altri potrebbero aver riscontrato difficoltà nell’uso del dispositivo. Si sottolinea che nessuno dei partecipanti coinvolti ha mai fatto uso di strumenti aR prima dell’esperimento: la naturale predisposizione all’utilizzo di questa nuova tecnologia incide molto su come è stata percepita durante le prove. Inoltre, le mediane dei boxplot rappresentativi delle condizioni “C-aR” e “C-S” registrano valori più alti rispetto alle altre condizioni. Questo significa che i partecipanti hanno impiegato più tempo per portare a termine l’assemblaggio quando collaboravano con il cobot, indipendentemente da come

venivano loro mostrate le istruzioni, rispetto a quando hanno assemblato manualmente. Nelle condizioni in cui è prevista una collaborazione *human-robot* è il cobot a dettare il ritmo delle operazioni, non essendo in grado nel contesto di questo esperimento di adattarsi dinamicamente al ritmo di lavoro dei partecipanti. Quindi, anche se un partecipante ha completato un *task* in maniera rapida, il cobot mantiene un ritmo costante e predeterminato, risultando più lento e aumentando il tempo di assemblaggio. Difatti, la maggior parte dei partecipanti non ha agito in contemporanea al cobot ma ha atteso che quest'ultimo finisse il suo movimento prima di passare all'azione successiva, incrementando notevolmente i tempi registrati. Comparando le condizioni, quindi, la condizione di assemblaggio "C-aR" presenta tempi di assemblaggio più lunghi e variabili. Di contro, la condizione "M-S" (assemblaggio manuale con istruzioni tramite schermo) mostra tempi brevi e meno variabili.

Il confronto tra i boxplot in Figura 7.2 anticipa la presenza di una differenza significativa delle medie ( $p\text{-value} < 0.05$ ) dei tempi di assemblaggio tra le condizioni "C-S" ed "M-S".

Il boxplot rappresentato in Figura 7.3 rappresenta proprio la distribuzione di valori di tale differenza. Poiché l'IQR è quasi nella sua totalità sopra lo 0, c'è una differenza tra i tempi di assemblaggio delle due condizioni e questa differenza è positiva. Prima di procedere con il test di significatività, è stato effettuato un test di normalità sulla tale distribuzione dei dati.

Il valore del  $p\text{-value}$  risultante dal test suggerisce che la distribuzione delle differenze tra le durate medie delle due condizioni segue una normale. Motivo per cui è stato scelto il test di significatività "*Paired t-test*".

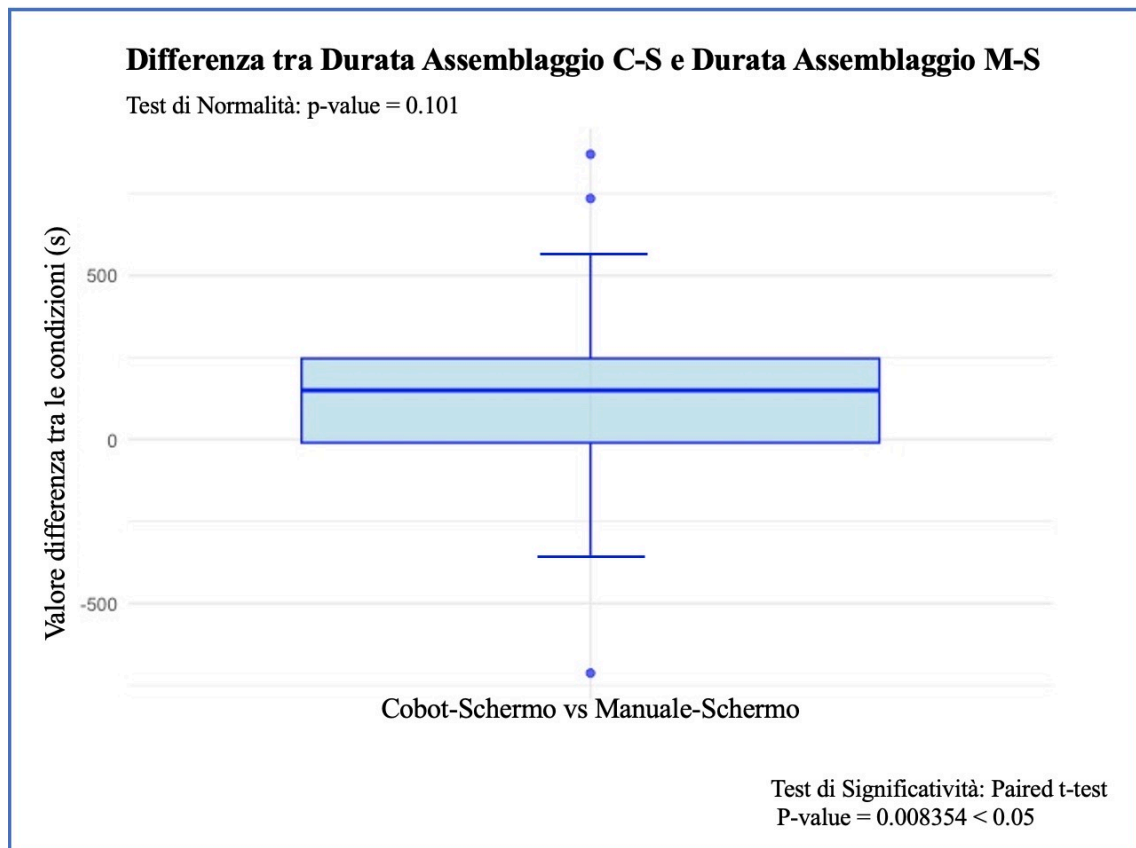


Figura 7.3 Boxplot della differenza tra le durate di assemblaggio registrate dai partecipanti nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S)

Questo test compara la media delle differenze dei tempi di assemblaggio delle due configurazioni. I due campioni di dati sono accoppiati (condizione necessaria affinché questo test possa essere usato), ovvero ogni partecipante ha assemblato in entrambe le condizioni e quindi ogni osservazione in una condizione corrisponde ad un'osservazione specifica nell'altra.

Considerate:

$X_i$  = Durata di assemblaggio Cobot-Schermo

$Y_i$  = Durata di assemblaggio Manuale-Schermo

Per  $i = 1, \dots, n$

Ogni coppia  $(X_i; Y_i)$  rappresenta i tempi di assemblaggio dello stesso partecipante nelle due condizioni. La statistica  $t$  è calcolata come segue:

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$$

Dove:

- $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$  con  $d_i = (X_i - Y_i)$
- $s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$
- $n$  è il numero totale delle coppie

Poiché, nel caso in esame il  $p$ -value del *Paired t-test* è inferiore al livello di significatività scelto:

$$pvalue = 0.008354 < pvalue = 0.05$$

si può concludere che esista una differenza significativa tra la durata di assemblaggio “Cobot-Schermo” e quella “Manuale-Schermo”.

La Figura 7.4 mostra le medie delle durate di assemblaggio nelle condizioni “C-S” e “M-S” per ciascun partecipante all’esperimento. Ogni linea colorata collega le misurazioni di uno stesso partecipante nelle due condizioni di assemblaggio. Da come si può vedere, la maggior parte dei partecipanti mostra tempi di assemblaggio inferiori nella modalità “M-S” e nel passaggio la riduzione dei tempi per alcuni è davvero significativa. Interessante è il comportamento del partecipante 4: diversamente dagli altri, registra un aumento notevole della durata di assemblaggio nel passare dalla configurazione “Cobot-Schermo” alla configurazione “Manuale-Schermo”. Tale risultato è da riferirsi all’ordine con cui sono state effettuate le prove di questo partecipante: avendo assemblato all’inizio dell’esperimento proprio nella condizione “Manuale-Schermo” ha registrato tempi più lunghi data la mancata esperienza con il sistema. Lo stesso discorso vale per il partecipante 11 e per il partecipante 8: anche per loro la condizione “M-S” è stata proposta come prima (Tabella 6.5)

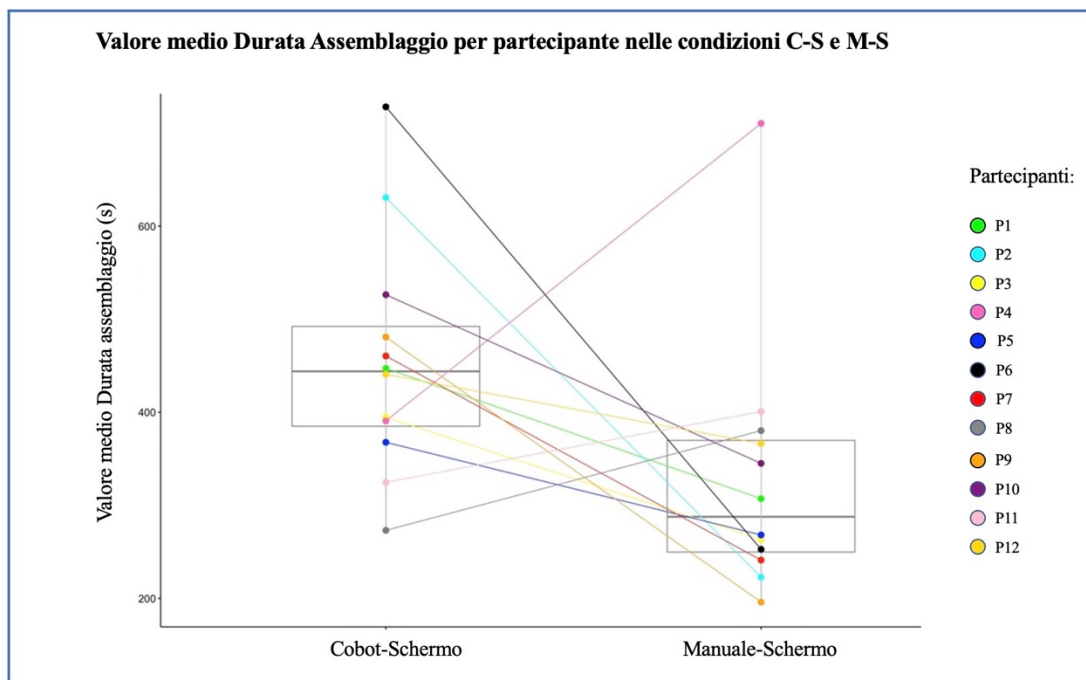


Figura 7.4 Boxplot della durata media di assemblaggio registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio della durata di assemblaggio registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante.

### SCL

La *Skin Conductance Level* è la componente tonica dell'EDA (analizzata nel dettaglio nel Capitolo 6), anche questa ottenuta processando i dati provenienti dall'Empatica E4. Nella Figura 7.5 sono mostrati i quattro boxplot a confronto rappresentativi dei dati SCL nelle quattro condizioni di assemblaggio. Risulta subito evidente che le condizioni di assemblaggio manuale risultano quelle in cui si registra un maggiore *arousal* fisiologico, probabilmente dovuto al maggiore impegno richiesto. Difatti, nelle condizioni manuali, non c'è il cobot a supportare le azioni e le scelte dei partecipanti: ogni decisione sta all'operatore, motivo per cui lo stress e la fatica possono sopraggiungere prima. Si ricordi che ogni assemblaggio differisce dal precedente e dal successivo (in modo che non si debba tener conto dell'effetto apprendimento), motivo per cui il partecipante deve mantenere sempre alta l'attenzione per evitare di compiere un montaggio errato. Il cobot, invece, è programmato per compiere non solo attività di supporto pezzo ma anche attività di *picking* dei componenti oggetto di variabilità (colore e disposizione ruote e colore tavola). In questa condizione, quindi, l'operatore è più tranquillo in quanto gli è demandato solo l'attività di *joining*.

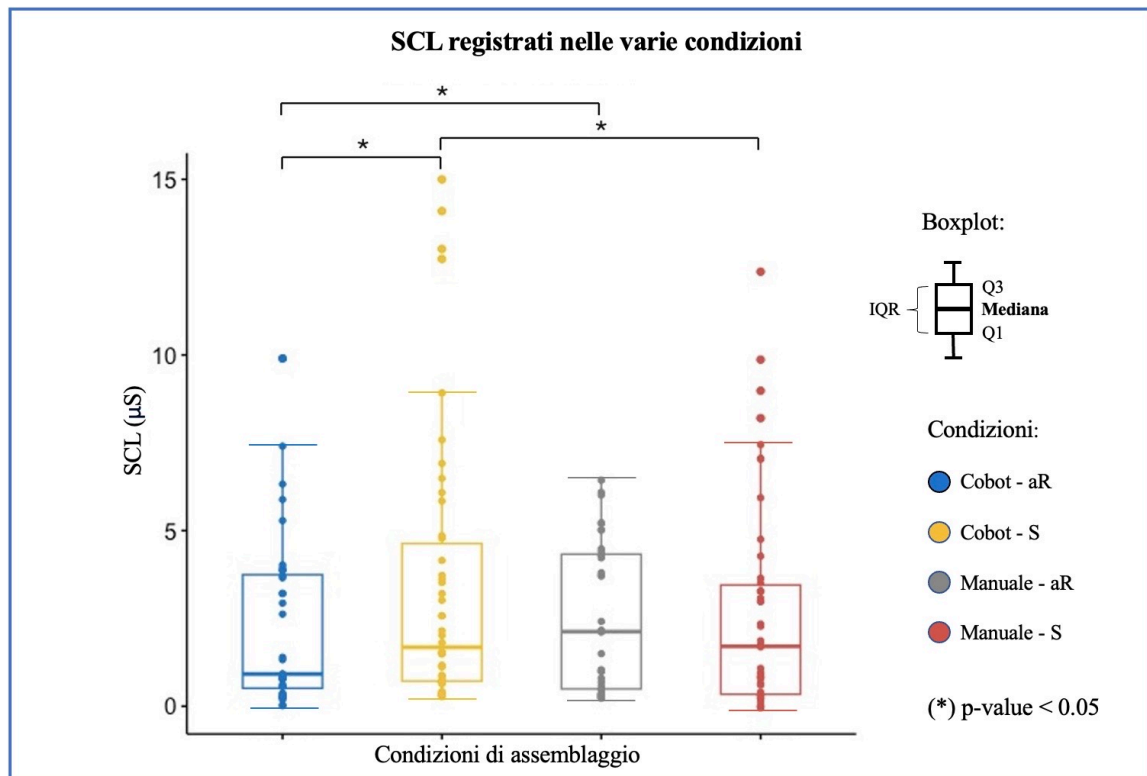


Figura 7.5 Confronto tra boxplot dei valori registrati di SCL nelle varie condizioni di assemblaggio

Interessante risulta il valore di mediana registrato nella condizione “C-aR”. L’uso del dispositivo RealWear, seppure inizialmente di difficile accettazione da parte dei partecipanti, può aver stimolato interesse e curiosità tali da moderare le risposte di stress fisiologico. Inoltre, la presenza del cobot in questa configurazione, come detto in precedenza, potrebbe aver ridotto l’incertezza dei partecipanti e la necessità di decisioni immediate da parte loro.

Il confronto tra i boxplot in Figura 7.5 anticipa la presenza di differenze significative tra le condizioni “C-aR” e “C-S”, “C-aR” e “M-aR” e tra “C-S” e “M-S”.

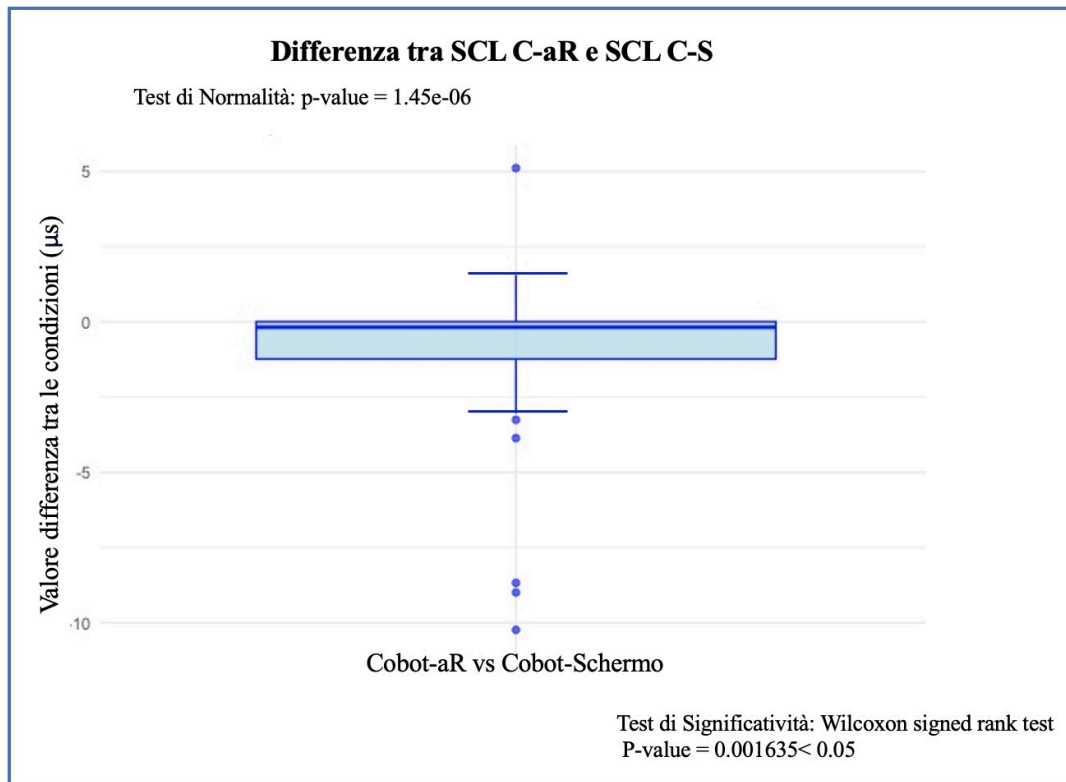


Figura 7.6 Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di  $p$ -value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di  $p$ -value.

In particolare, in Figura 7.6 è rappresentato il boxplot della differenza tra gli SCL della condizione “Cobot-aR” e quella “Cobot-Schermo”. Prima di procedere con il test di significatività è stato effettuato un test di normalità sulla distribuzione dei dati. Il valore del  $p$ -value del test è significativamente inferiore al  $p$ -value scelto: ciò indica che la distribuzione non è normale. Ciò giustifica l’uso del test non parametrico *Wilcoxon signed rank test* (Rey D. & Neuhäuser M., 2011), alternativa al *Paired t- test* quando i dati non soddisfano l’assunzione di normalità. Anche qui è necessario che i campioni di dati da confrontare siano accoppiati.

La statistica  $T$  del *Wilcoxon signed rank test* è così calcolata:

$$T = \min(W^+; W^-)$$

Dove:

- $W^+$  è la somma dei ranghi positivi



- $W^-$  è la somma dei ranghi negativi
- $W = \sum_{i=1}^n R_i \text{sign}(d_i)$
- $R_i$  è il rango della differenza  $d_i$
- $\text{sign}(d_i)$  è il segno della differenza  $d_i$
- $d_i = X_i - Y_i$ , dove  $X_i$  e  $Y_i$  sono le osservazioni nelle due condizioni.

Il *p-value* del Wilcoxon rank test risulta inferiore al *p-value* di 0.05 motivo per cui è lecito considerare la differenza tra le condizioni “C-aR” e “C-S” statisticamente significativa. Questo rimarca ancora più il concetto secondo cui i partecipanti risultano meno stressati cognitivamente quando vengono supportati dal cobot e le istruzioni vengono loro somministrate tramite RealWear rispetto alle istruzioni presentate su schermo. Ciò è rimarcato anche dall’IQR di questo boxplot, che si presenta al di sotto dello 0.

Nei boxplot in Figura 7.7 (a) e in Figura 7.7 (b) è rimarcato il concetto secondo cui è statisticamente significativa la differenza tra le condizioni di assemblaggio che prevedono o meno il supporto del cobot. I partecipanti trovano meno stressante la configurazione con il cobot piuttosto che quella di assemblaggio manuale per i motivi di cui sopra.

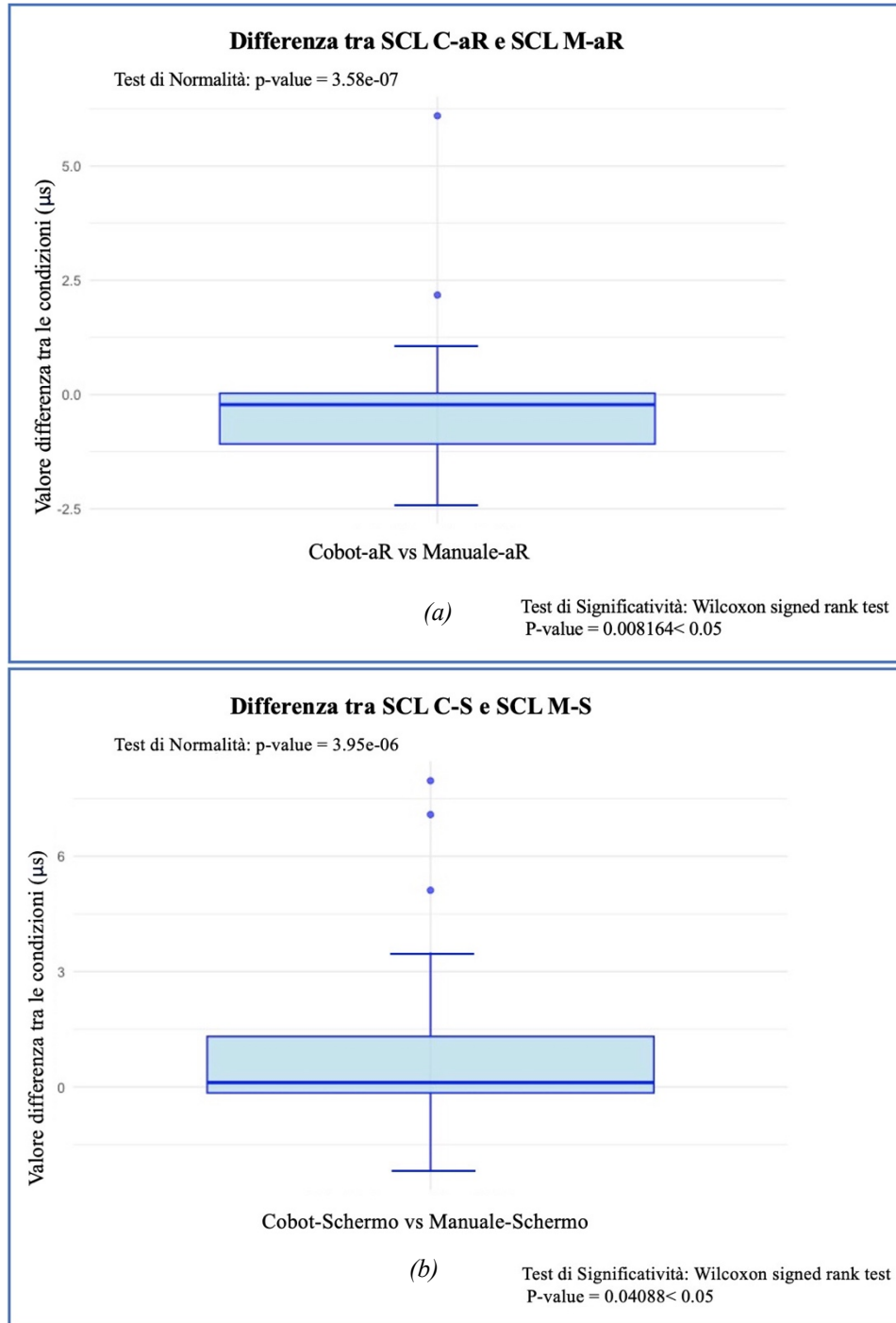


Figura 7.7 (a) Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-aR e Manuale-aR. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value. (b). Boxplot dei valori differenza degli SCL registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

I grafici in Figura 7.8, Figura 7.9, Figura 7.10 mostrano le medie delle SCL nelle varie condizioni di assemblaggio per ciascun partecipante all'esperimento. Ogni linea colorata collega le misurazioni di uno stesso partecipante tra due condizioni di assemblaggio.

La transizione dalla configurazione "Cobot-aR" a quella "Cobot-Schermo" vede un aumento della SCL per la maggior parte dei partecipanti. Ciò indica che le istruzioni somministrate tramite schermo vengono percepite più stressanti di quelle con RealWear. Inoltre, il confronto tra le condizioni "Cobot-aR" e "Manuale-aR" è interessato da un aumento significativo del SCL dei partecipanti. L'assemblaggio manuale richiede maggiore carico cognitivo e quindi maggiore livello di *arousal* fisiologico. Infine, la transizione da "Cobot-Schermo" a "Manuale-Schermo" mostra una diminuzione di SCL per la maggior parte dei partecipanti.

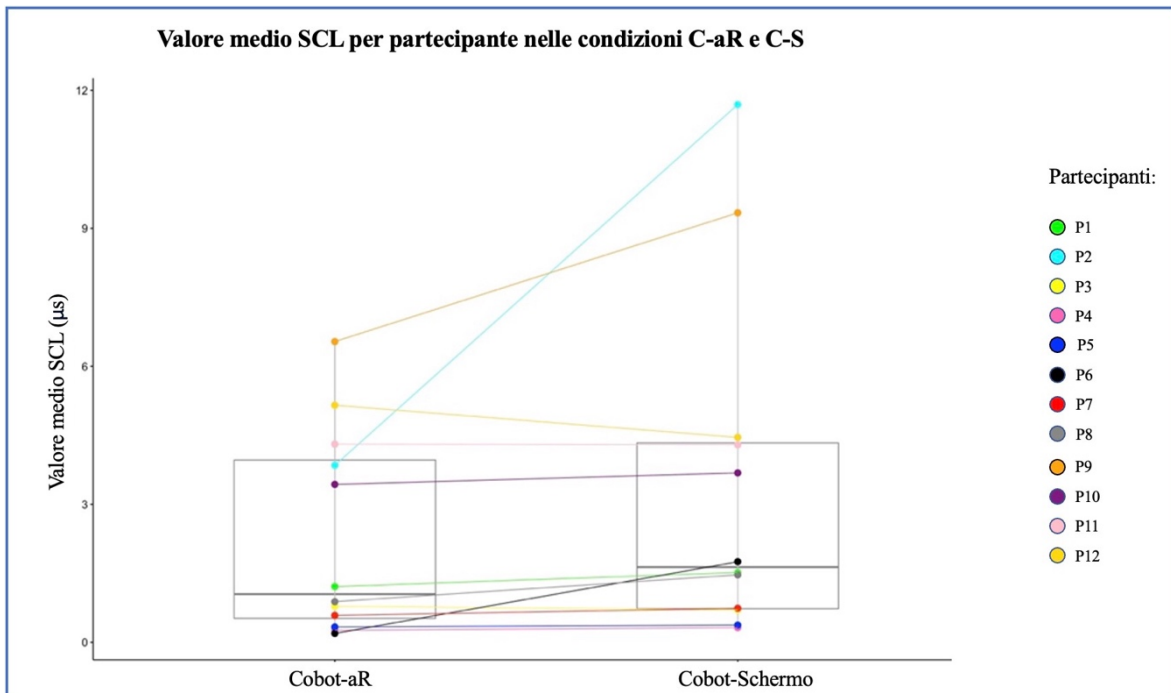


Figura 7.8 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

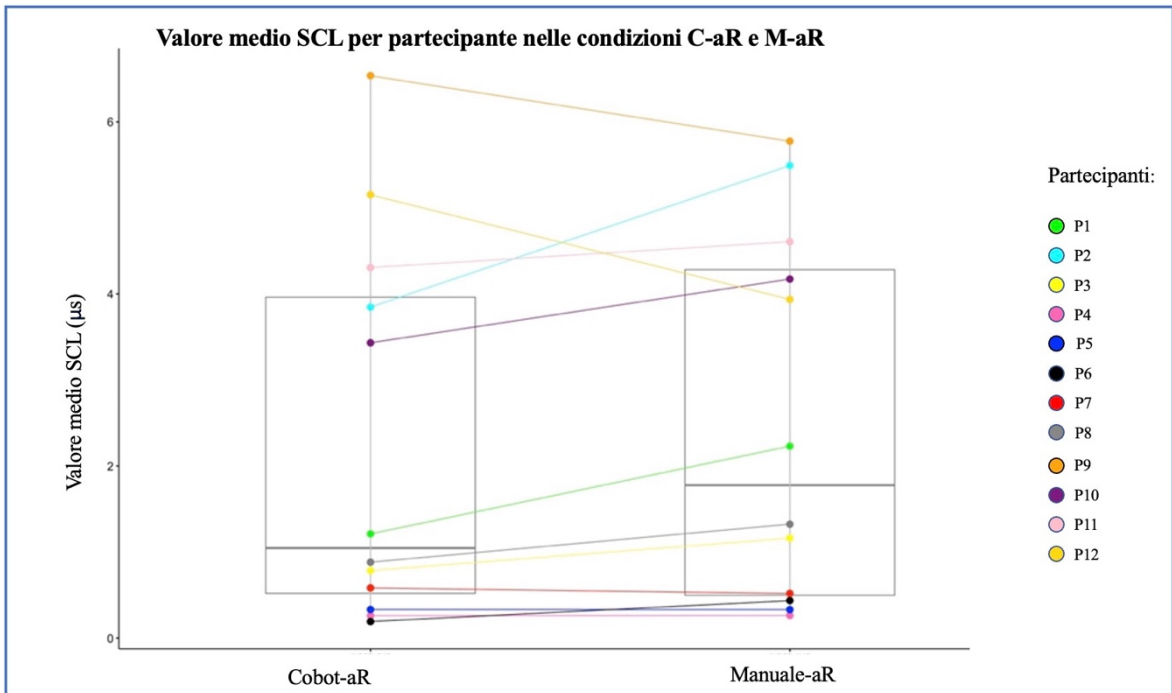


Figura 7.9 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Manuale-aR (M-aR). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

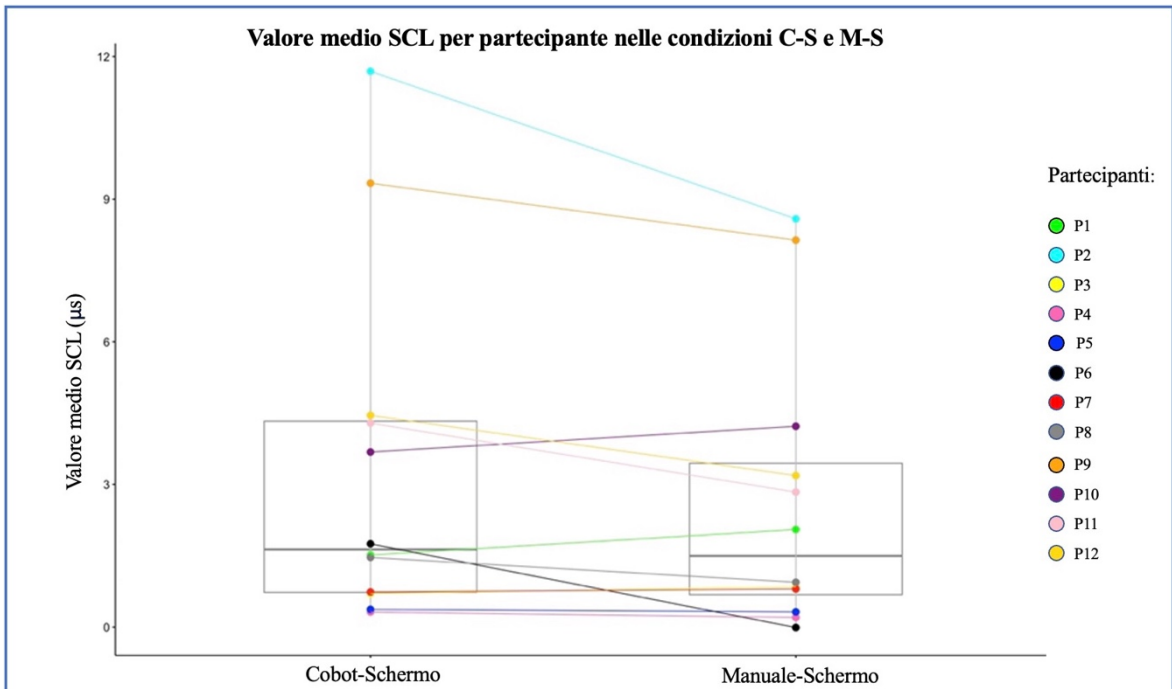


Figura 7.10 Boxplot della durata media di SCL registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-Schermo (C-S) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di SCL registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

## SCR

L'SCR (o "Skin Conductance Response") è la componente fasica dell'EDA (analizzata nel Capitolo 6). Anche questa metrica è stata ottenuta processando i dati dell'Empatica E4. A differenza del SCL, risponde a stimoli specifici ed è una metrica più reattiva.

Nella Figura 7.11 è presentato il confronto dei dati di SCR per ciascuna delle 4 condizioni di assemblaggio proposte ai partecipanti. Le mediane dei vari boxplot sono alquanto vicine tra loro: non c'è una grande differenza di tale metrica tra le condizioni. Questo, così come l'elevata variabilità caratterizzante queste distribuzioni di dati, sottolineano che tra i partecipanti dell'esperimento vi sono risposte fisiologiche talmente differenti (dipendenti da fattori personali, abilità intrinseche e livelli di gestione dello stress e dell'ansia differenti) da non riuscire a differenziare le risposte SCR al punto di avere differenze significative dal punto di vista statistico.

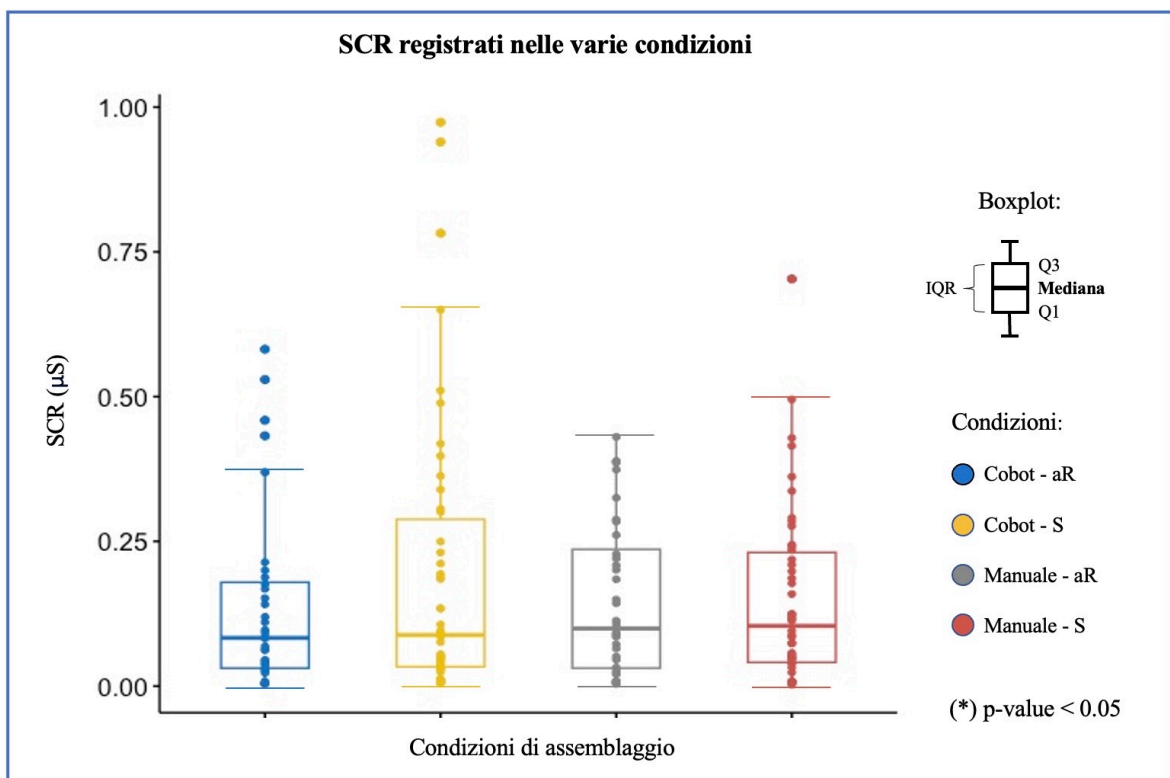


Figura 7.11 Confronto tra boxplot dei valori registrati di SCR nelle varie condizioni di assemblaggio

### Average duration of whole fixations

Da questa sezione in poi si descriveranno le analisi compiute sulle metriche di *eye-tracking* ottenute con l'uso dello strumento Tobii Pro Glasses 3. In particolare, seguiranno le analisi compiute sulla prima metrica: *Average duration of whole fixations* (la cui descrizione è svolta al Capitolo 6). Si tenga in considerazione che, durante l'esperimento, i partecipanti hanno indossato il dispositivo RealWear al di sopra del dispositivo di *eye-tracking* Tobii Pro Glasses 3 (nelle configurazioni che ne richiedevano l'utilizzo). Tale disposizione (Figura 6.6) potrebbe aver introdotto dei *bias* nei dati oculari raccolti che potrebbero aver influenzato la precisione riscontrata nelle misurazioni.

In Figura 7.12 è presentato il confronto tra boxplot di dati riguardanti l'*Average duration of whole fixations* in ciascuna delle quattro condizioni di assemblaggio presentate. Le mediane più alte sono registrate nelle condizioni "M-aR" e "M-S": ciò suggerisce che i partecipanti impiegano più tempo a fissare una certa area d'interesse, comportamento indicativo di maggiore carico cognitivo, negli assemblaggi manuali (indipendentemente dal tipo di somministrazione scelta per le istruzioni).

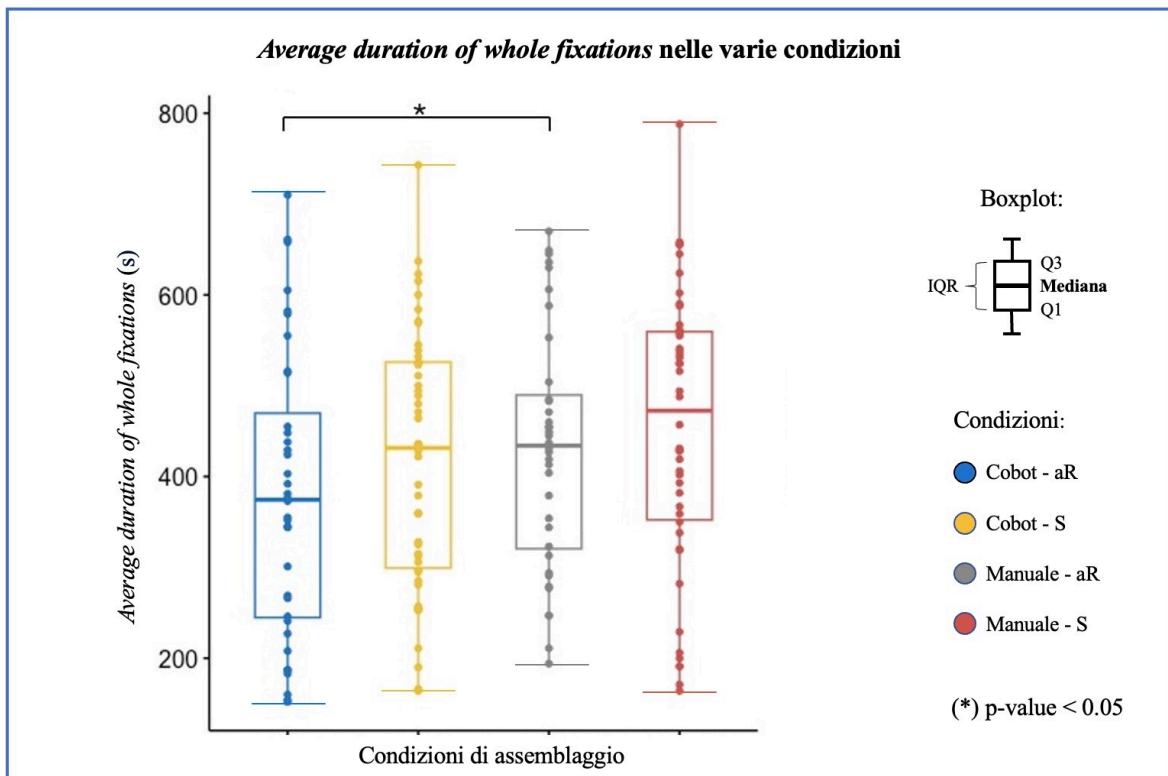


Figura 7.12 Confronto tra boxplot dei valori registrati di *Average duration of whole fixations* nelle varie condizioni di assemblaggio

Inoltre, sembra che la lettura e l'utilizzo delle istruzioni su schermo richieda fissazioni assai più lunghe rispetto a quelle presentate su RealWear. Risulta significativa ai fini statistici la differenza tra le condizioni "C-aR" e "M-aR" riportata in Figura 7.13. Dai risultati del test di normalità si ottiene una p-value che, seppur leggermente superiore al livello di significatività scelto, porta la distribuzione dei dati al limite della normalità. Ma il test di significatività *Paired t-test* indica che la differenza della metrica nelle due condizioni risulta significativa.

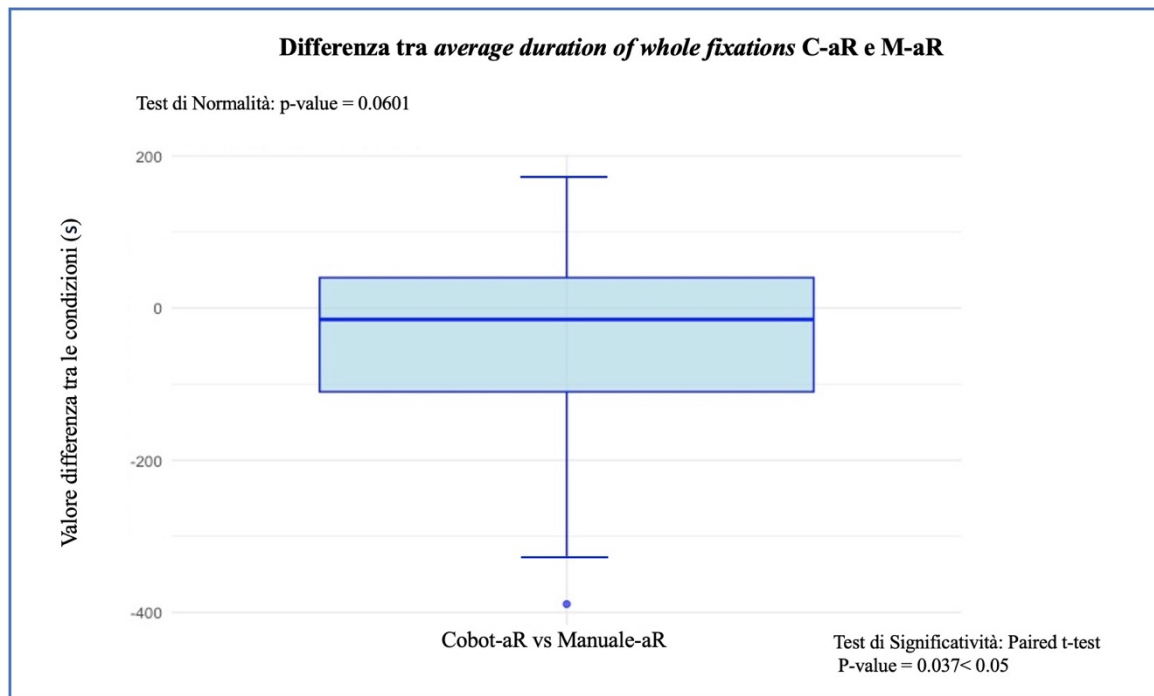


Figura 7.13 Boxplot dei valori differenza dell'Average duration of whole fixations registrati nella condizione Cobot-aR e Manuale-aR. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

Ma l'IQR include il valore nullo, motivo per cui è ragionevole pensare che una porzione dei partecipanti non ha riscontrato una differenza particolarmente marcata tra le due condizioni di assemblaggio.

Il grafico in Figura 7.14 mostra la durata media delle fissazioni in secondi per ciascun partecipante nelle condizioni "Cobot-aR" (C-aR) e "Manuale-aR" (M-aR). Si noti come le fissazioni più lunghe avvengano nella condizione "Manuale-aR" rispetto a "Cobot-aR".

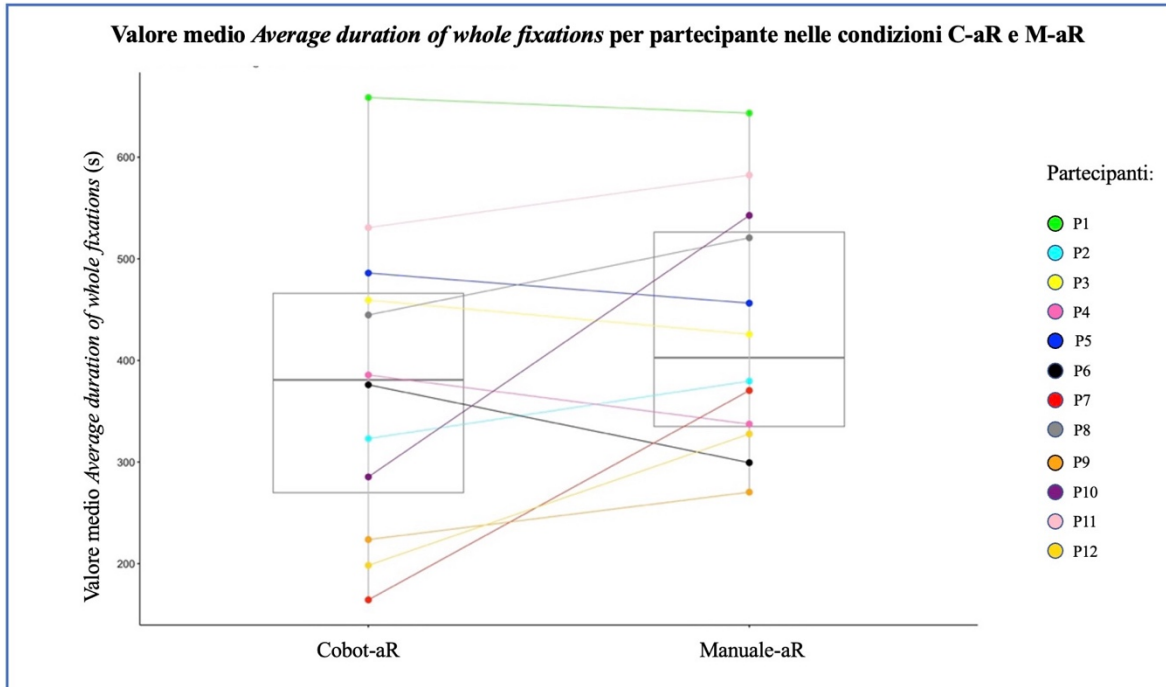


Figura 7.14 Boxplot della durata media di Average duration of whole fixations registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Manuale-aR (M-aR). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average duration of whole fixations registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

Questo può essere motivato dal fatto che in presenza dei cobot, i partecipanti sono meno soliti guardare le istruzioni in quanto l'utilità di quest'ultime si abbassa se a compiere le attività cruciali di scelta del corretto componente e relativo posizionamento è il cobot stesso.



### Average whole fixation pupil diameter

Come descritto nel Capitolo 6, il diametro medio della pupilla riscontrato durante le fissazioni è una misura fisiologica indicativa del carico cognitivo: un aumento del diametro della pupilla stessa è associato ad un maggiore carico cognitivo e a livelli di attenzione più alti. Nella Figura 7.15, in particolare, sono presentati i 4 boxplot di confronto di questa metrica nelle 4 condizioni di assemblaggio. Da una prima analisi sembrerebbe che i partecipanti hanno un maggior carico cognitivo durante l'assemblaggio manuale con le istruzioni presentate tramite RealWear.

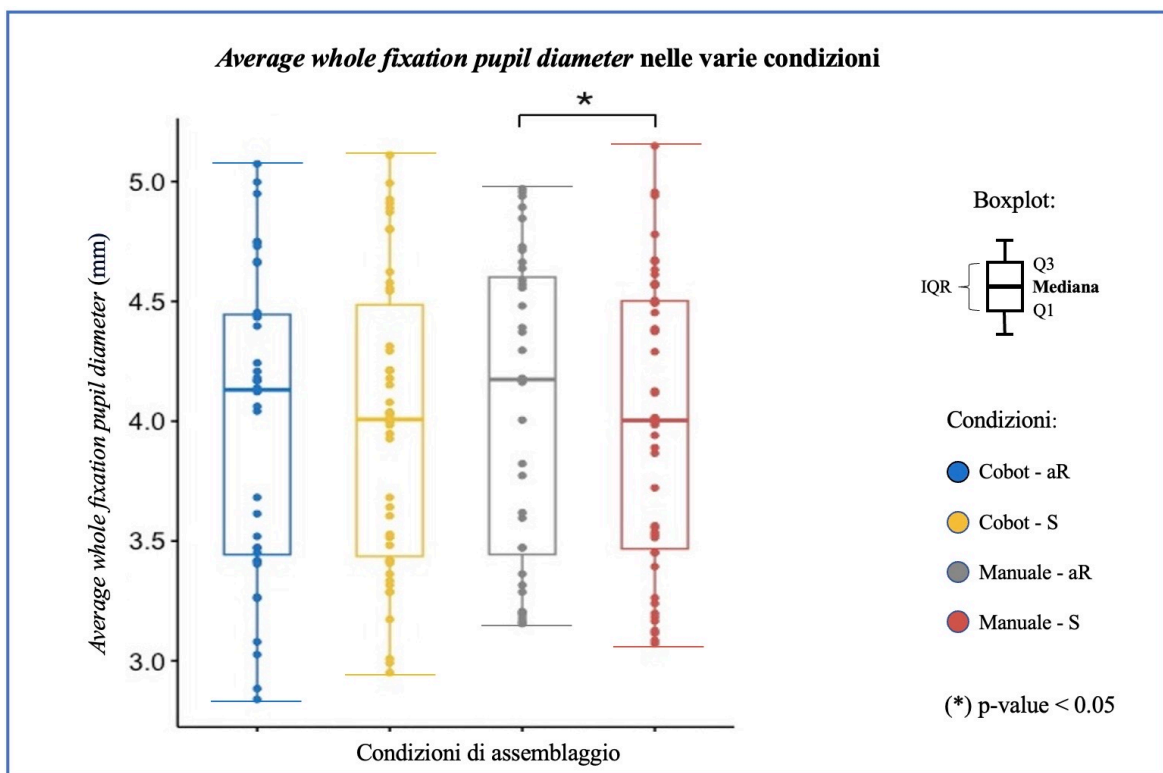


Figura 7.15 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average whole fixation pupil diameter nelle varie condizioni di assemblaggio

Le analisi successive hanno individuato una differenza significativa tra l'Average whole fixation pupil diameter nella condizione "M-aR" e quella nella condizione "M-S" (Figura 7.16).

Il test di normalità suggerisce che i dati seguono una distribuzione normale. Il Paired t-test porta ad un valore di p-value molto inferiore a 0.5, motivo per cui è certo considerare la differenza di metrica tra le due condizioni statisticamente significativa.

L'IQR relativamente stretto e l'assenza di *outlier* indicano che le differenze nel diametro pupillare tra le due condizioni sono abbastanza consistenti tra i partecipanti. Questo suggerisce una risposta fisiologica relativamente uniforme all'uso di aR rispetto alle istruzioni su schermo durante l'assemblaggio manuale. La mediana positiva, infatti, porta a considerare che i partecipanti hanno un diametro pupillare maggiore (e quindi maggior carico cognitivo) nella condizione "Manuale-aR" rispetto a "Manuale-Schermo". Ciò suggerisce che l'uso di aR durante l'assemblaggio manuale potrebbe richiedere un maggiore sforzo cognitivo e livelli di attenzione rispetto alle istruzioni su schermo.

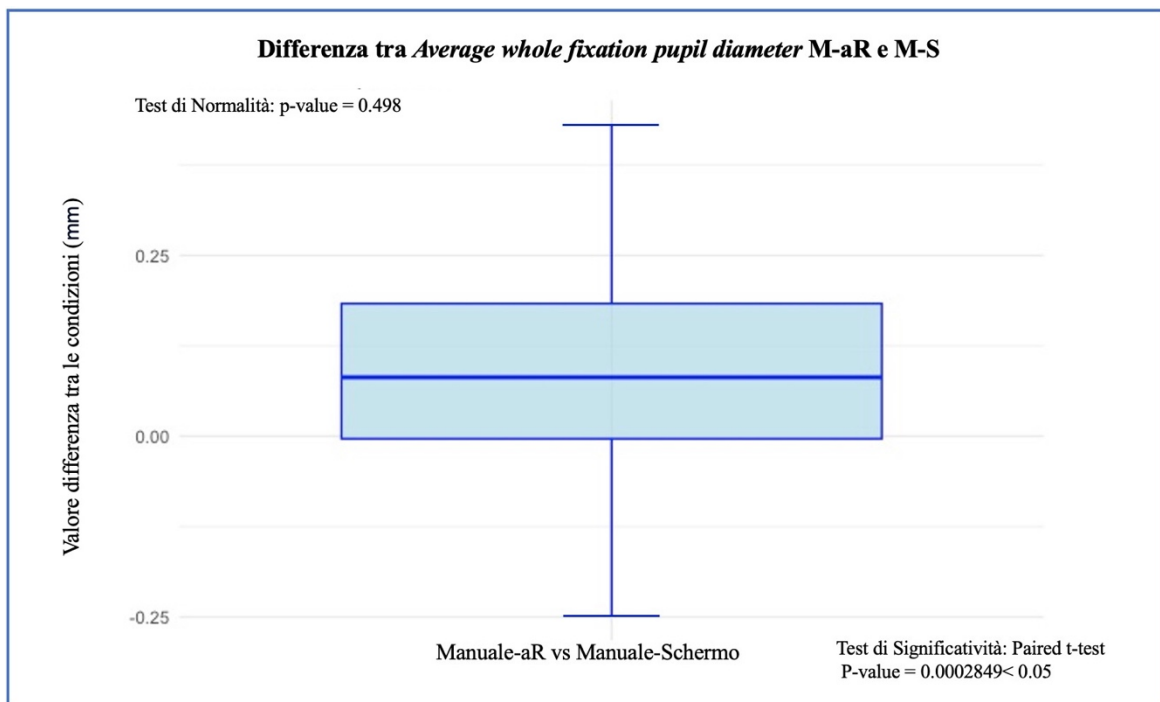


Figura 7.16 Boxplot dei valori differenza dell'*Average whole fixation pupil diameter* registrati nella condizione *Manuale-aR* e *Manuale-Schermo*. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

Il grafico in Figura 7.17 mostra la media dei valori riscontrati per il diametro pupillare per ciascun partecipante nelle condizioni "M-aR" (Assemblaggio manuale con aR) e "M-S" (Assemblaggio manuale con schermo). I partecipanti hanno maggior diametro pupillare nella condizione di assemblaggio manuale con istruzioni aR rispetto a quelle presentate tramite schermo. Questo può essere dovuto anche alla vicinanza della lente dei RealWear agli occhi del partecipante rispetto alla posizione relativa dello schermo.

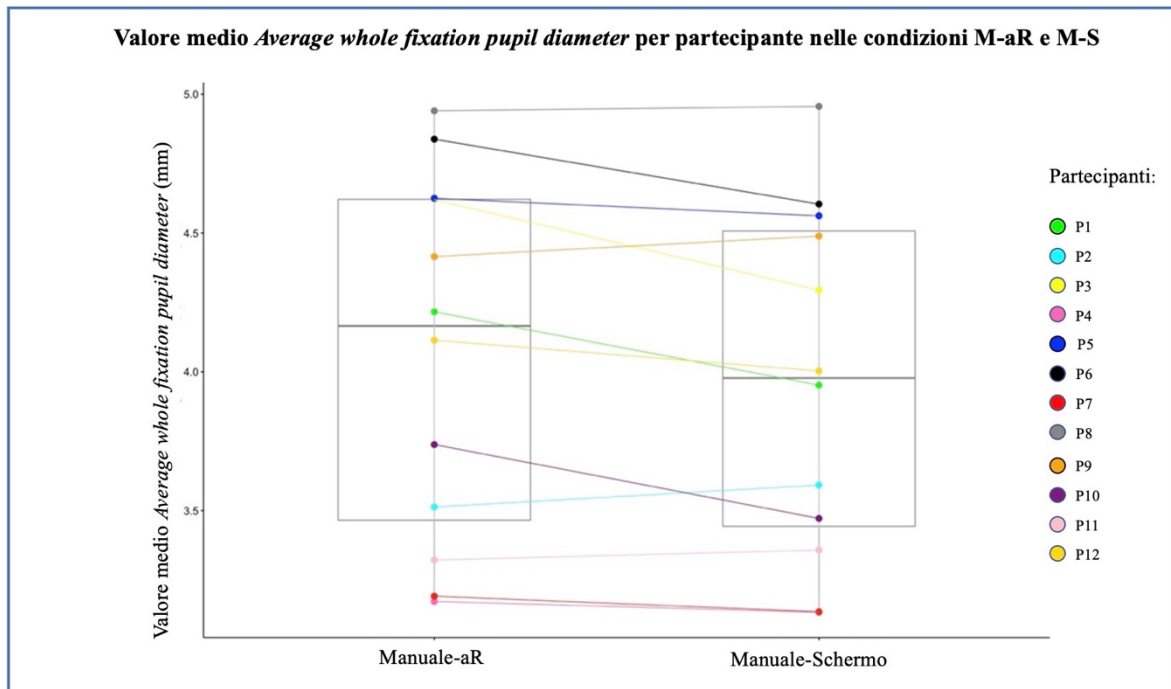


Figura 7.17 Boxplot della durata media di Average whole fixation pupil diameter registrata da ogni partecipante nelle condizioni Manuale-aR (M-aR) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average whole fixation pupil diameter registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

Anche se gli outlier presenti, suggeriscono che alcuni partecipanti hanno mostrato risposte fisiologiche diverse.

### Average peak velocity of saccades

La Figura 7.18 mostra il confronto tra boxplot di dati rappresentativi dell'*Average peak velocity of saccades* nelle quattro condizioni sperimentali. La velocità di picco delle saccadi (come riportato nel Capitolo 6) misura la massima velocità raggiunta dalle saccadi tra una fissazione ed un'altra. Un aumento di tale metrica è correlato con un aumento del carico cognitivo in quanto il movimento oculare diventa più rapido per acquisire quante più informazioni visive possibili. In particolare, lo scenario qui presentato mostra che i valori più alti sono raggiunti dalle condizioni che prevedono un assemblaggio con istruzioni tramite schermo. Durante l'esperimento, lo schermo su cui vengono mostrate le istruzioni è posizionato ad una certa distanza dal partecipante che, per attingere informazioni, sposta frequentemente lo sguardo tra lo stesso schermo e l'area di lavoro, la cui situazione porta a movimenti oculari più frequenti. Quando le istruzioni sono presentate tramite dispositivo aR RealWear, le informazioni sono sovrapposte direttamente al campo visivo del partecipante, che non deve distogliere lo sguardo dall'area di lavoro, con una conseguente riduzione delle saccadi e della loro velocità.

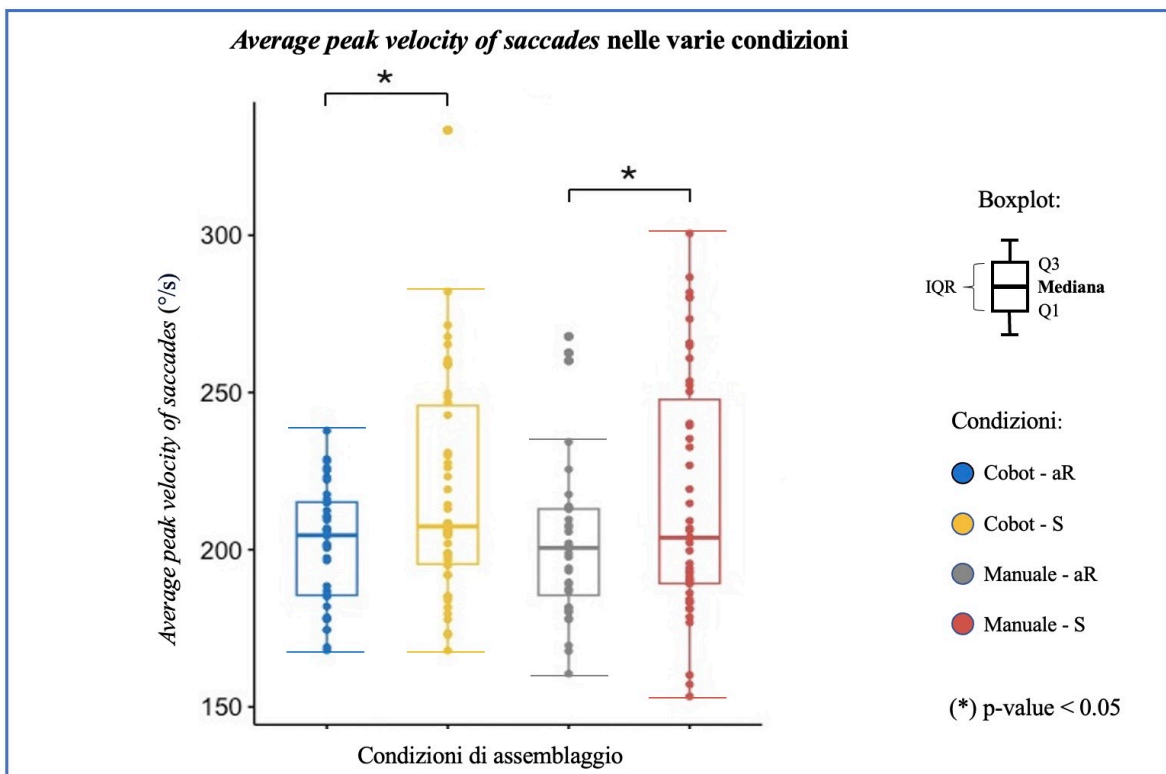
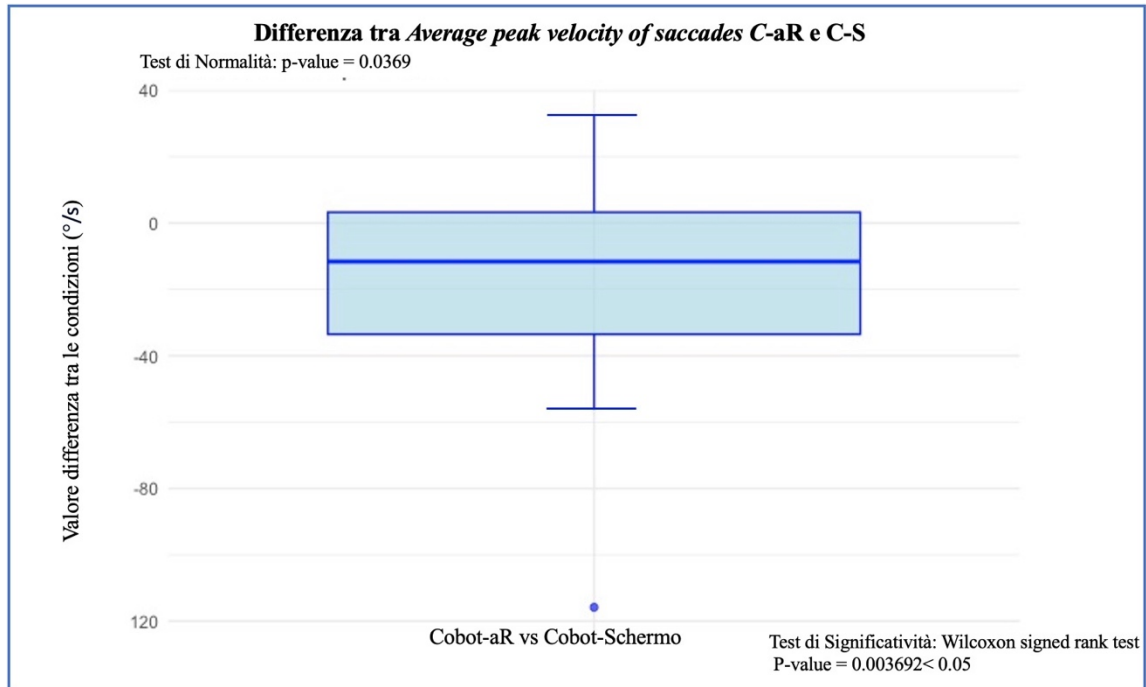
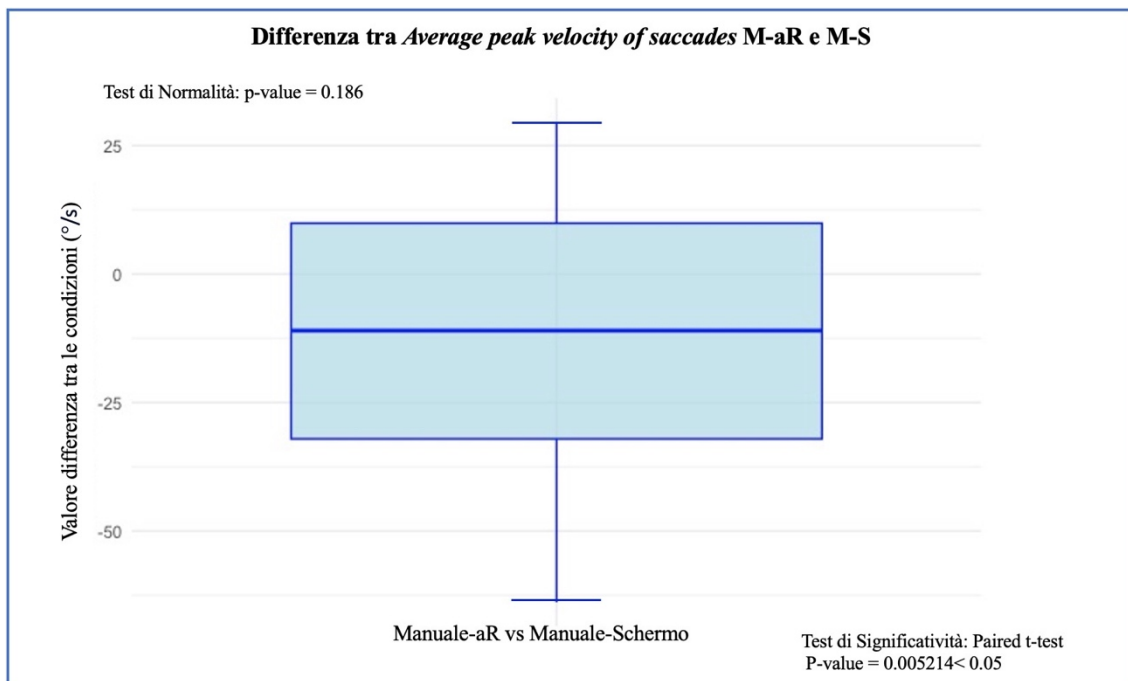


Figura 7.18 Confronto tra boxplot dei valori registrati di *Average peak velocity of saccades* nelle varie condizioni di assemblaggio

Infatti, risultano significative proprio le differenze tra condizioni che mettono a confronto la condizione di assemblaggio con istruzioni di aR rispetto a quelle presentate con schermo (Figura 7.19 (a) e Figura 7.19 (b)).



(a)



(b)

Figura 7.19 Boxplot dei valori differenza dell'Average peak velocity of saccades registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo (a) e Manuale-aR e Manuale-Schermo (b). (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

Difatti, se si scende a livello del singolo partecipante, come mostrato in Figura 7.20 e in Figura 7.21, si conferma quanto detto precedentemente: la velocità di picco media delle saccadi è generalmente più alta nelle condizioni con schermo (“C-S” e “M-S”) rispetto alle condizioni con aR (“C-aR” e “M-aR”).

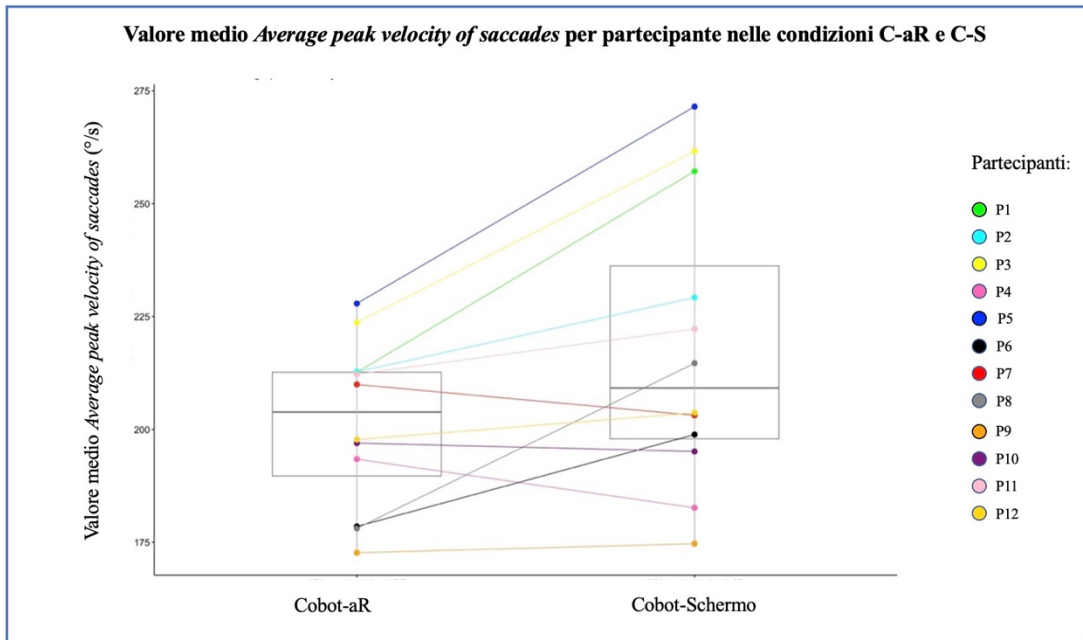


Figura 7.20 Boxplot della durata media di Average peak velocity of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average peak velocity of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

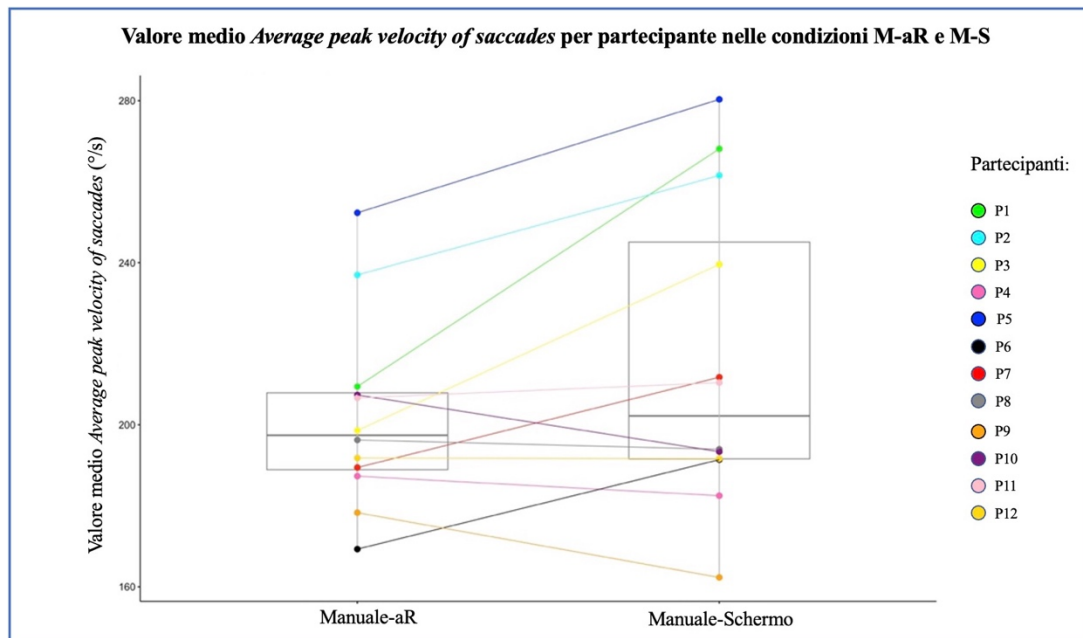


Figura 7.21 Boxplot della durata media di Average peak velocity of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Manuale-aR (M-aR) e Manuale-Schermo (M-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average peak velocity of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante

### Average amplitude of saccades

L'ampiezza delle saccadi (come spiegato nel Capitolo 6) è la misura della distanza angolare che l'occhio copre durante una saccade. Un'ampiezza maggiore indica che l'occhio si sposta di più tra due punti di fissazione, suggerendo una maggiore esplorazione visiva e, di conseguenza, un carico cognitivo più elevato.

Da quanto è visibile in Figura 7.22, quanto appena descritto accade con maggiore frequenza nelle condizioni di assemblaggio in cui le istruzioni vengono presentate tramite schermo per i motivi di distanza fisica dello stesso schermo dal punto di lavoro di cui già discusso.

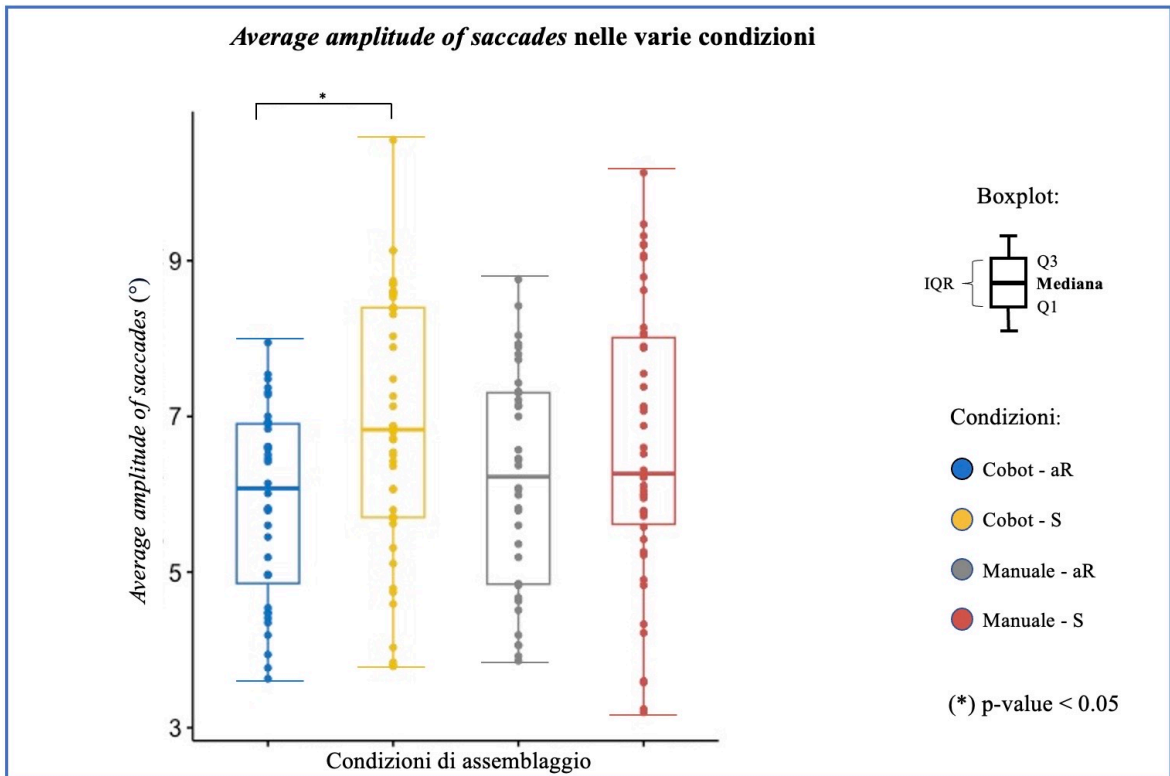


Figura 7.22 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Average amplitude of saccades nelle varie condizioni di assemblaggio

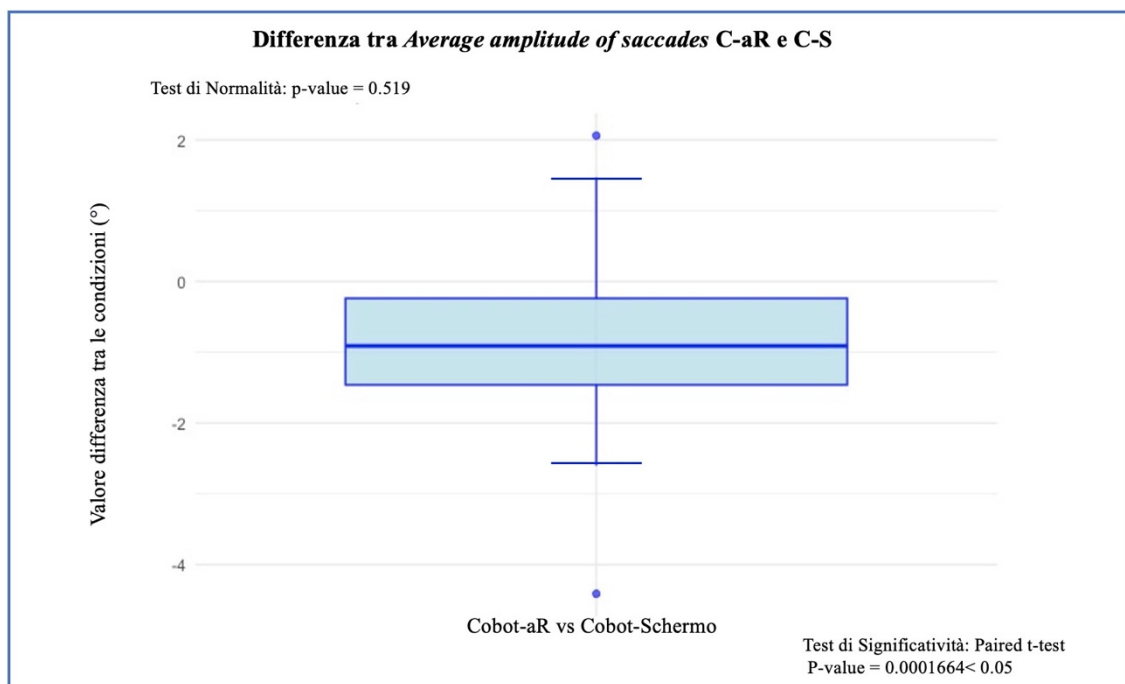


Figura 7.23 Boxplot dei valori differenza dell'Average amplitude of saccades registrati nella condizione Cobot-aR e Cobot-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

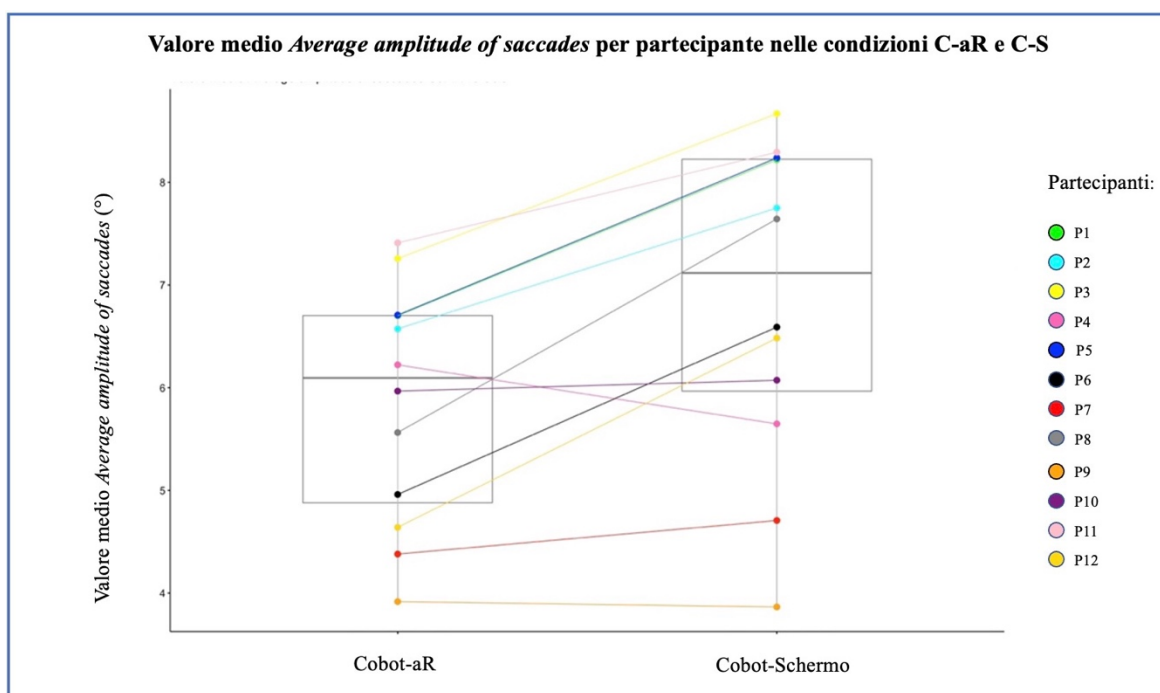


Figura 7.24 Boxplot della durata media di Average amplitude of saccades registrata da ogni partecipante nelle condizioni Cobot-aR (C-aR) e Cobot-Schermo (C-S). I puntini colorati rappresentano il valore medio di Average amplitude of saccades registrato nella specifica condizione di assemblaggio per quel dato partecipante



### Number of whole fixations/durata assemblaggio

Il numero di fissazioni rappresenta (come spiegato nel Capitolo 6) il numero totale di volte in cui l'occhio ha fissato uno specifico punto in un dato lasso di tempo. Avere un alto numero di fissazioni equivale a dire che il partecipante mostra maggiore attenzione o interesse verso uno specifico punto. I dati di questa metrica, così come della metrica "Number of saccades" sono stati divisi rispetto alla durata di assemblaggio. Questa decisione è stata presa per rendere i dati comparabili, specialmente perché nell'esperimento si sono registrati tempi molto variabili: non rapportare il numero di fissazioni alla durata d'assemblaggio avrebbe comportato una visione distorta dei dati e dei risultati non corretti.

Come mostrato in Figura 7.25, dal confronto tra i boxplot si evince che le condizioni che includono l'aR come modalità di somministrazione di istruzioni prevedono un numero maggiore di fissazioni.

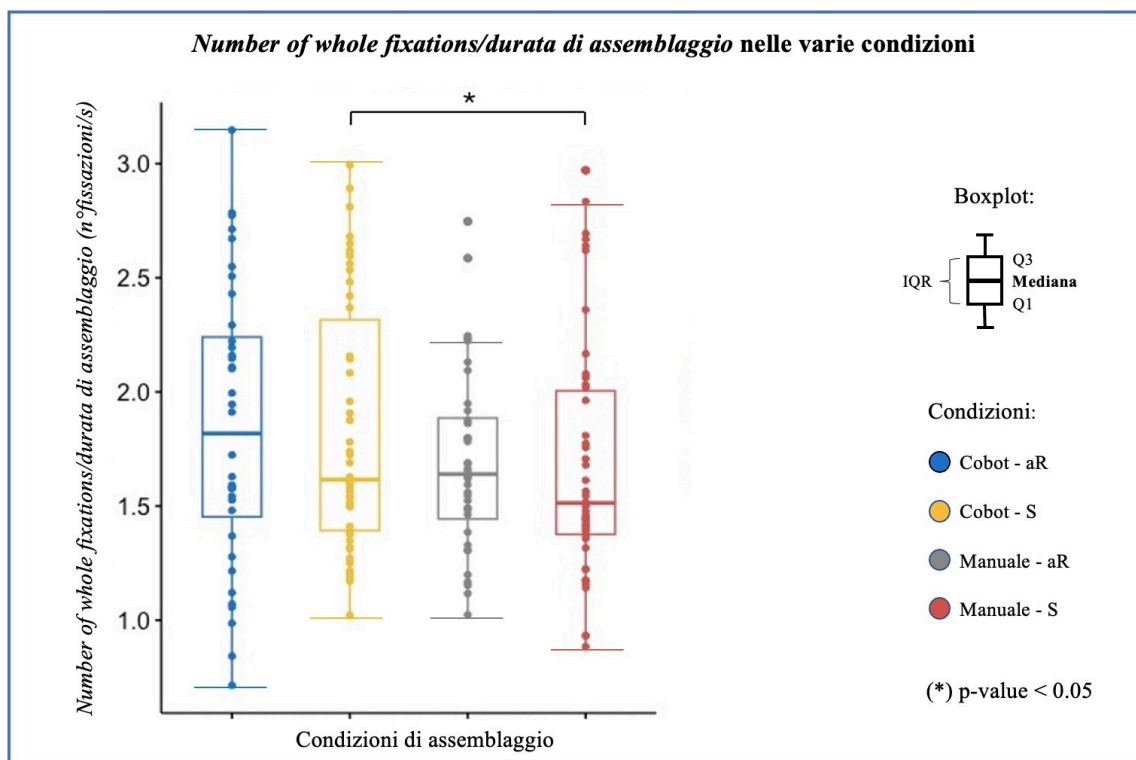


Figura 7.25 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Number of whole fixations/durata assemblaggio nelle varie condizioni di assemblaggio

Questo può derivare dalla necessità di elaborare con più attenzione le informazioni presentate con tale modalità, non solo perché sovrapposte al campo visivo

ma anche perché essendo una tecnologia non familiare per i partecipanti, questa condizione potrebbe aver loro imposto di compiere più fissazioni nella fase di comprensione e adattamento al sistema. I partecipanti potrebbero aver dovuto esplorare visivamente più spesso le istruzioni con aR anche per comprendere come interagire con il dispositivo. Inoltre, bisogna considerare che la mono lente del dispositivo RealWear potrebbe non da subito allinearsi in maniera corretta con il campo visivo naturale dei partecipanti, costringendoli a fare più movimenti oculari per ottenere una visualizzazione chiara delle informazioni.

Interessante, però, risulta la differenza risulta significativa tra le condizioni “Cobot-Schermo” e “Manuale-Schermo” risultante dai test (Figura 7.26). La condizione con il cobot mostra un numero normalizzato di fissazioni leggermente inferiore rispetto alla condizione manuale. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il cobot si occupa delle attività di *picking* e scelta della componentistica, riducendo la necessità per i partecipanti di consultare frequentemente le istruzioni. L'ampio IQR suggerisce che ci sono differenze individuali significative tra i partecipanti. Alcuni partecipanti potrebbero aver trovato più facile affidarsi al cobot e quindi hanno consultato meno le istruzioni, mentre altri potrebbero aver continuato a consultare le istruzioni nonostante il supporto del cobot.

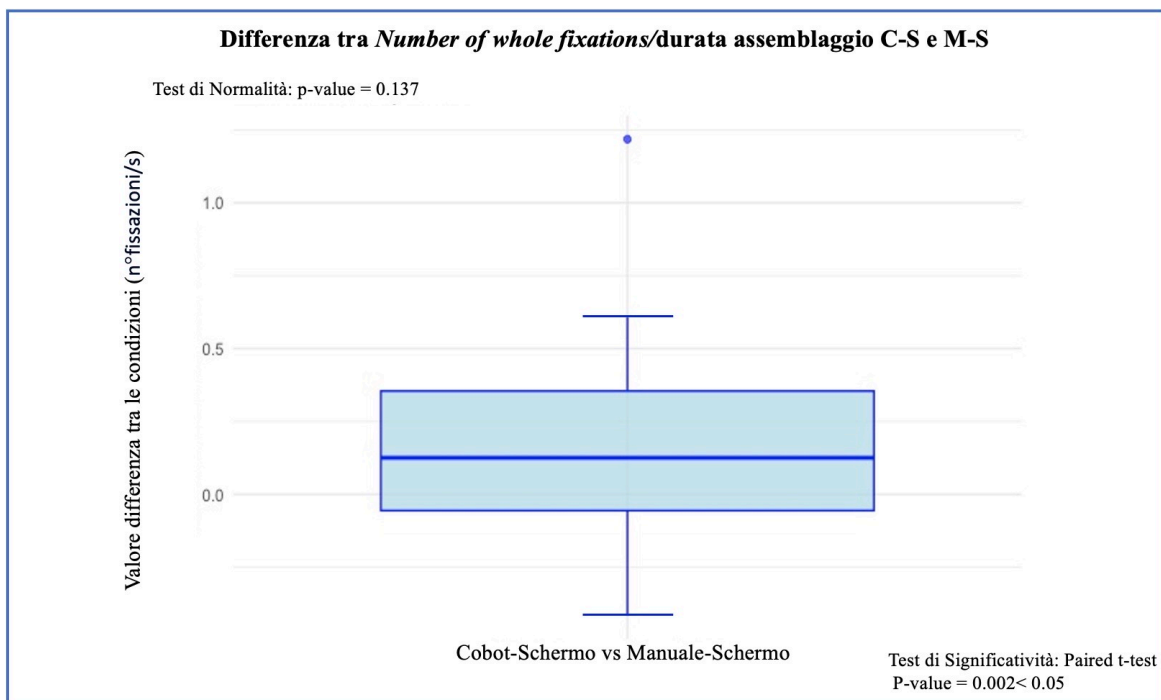


Figura 7.26 Boxplot dei valori differenza del *Number of whole fixations*/durata assemblaggio registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

### Number of saccades/durata assemblaggio

Le saccadi sono movimenti rapidi degli occhi che spostano il punto di fissazione da una parte all'altra del campo visivo. Anche il numero di saccadi è stato diviso per la durata d'assemblaggio, permettendo un confronto equo tra condizioni con differenti tempi di esecuzione.

La condizione "C-S" presenta la mediana più alta tra tutte le condizioni (Figura 7.27). Ciò indica che i partecipanti hanno effettuato un numero maggiore di saccadi quando utilizzavano il cobot con istruzioni su schermo. La condizione "M-aR" ha una mediana del numero di saccadi più alta rispetto alla condizione "M-S", ma inferiore rispetto a "C-S". I partecipanti potrebbero aver avuto bisogno di tempo per adattarsi alla tecnologia aR. Questo adattamento iniziale potrebbe aver causato un aumento temporaneo del numero di saccadi mentre cercavano di abituarsi nella lettura delle istruzioni sovrapposte all'area di lavoro.

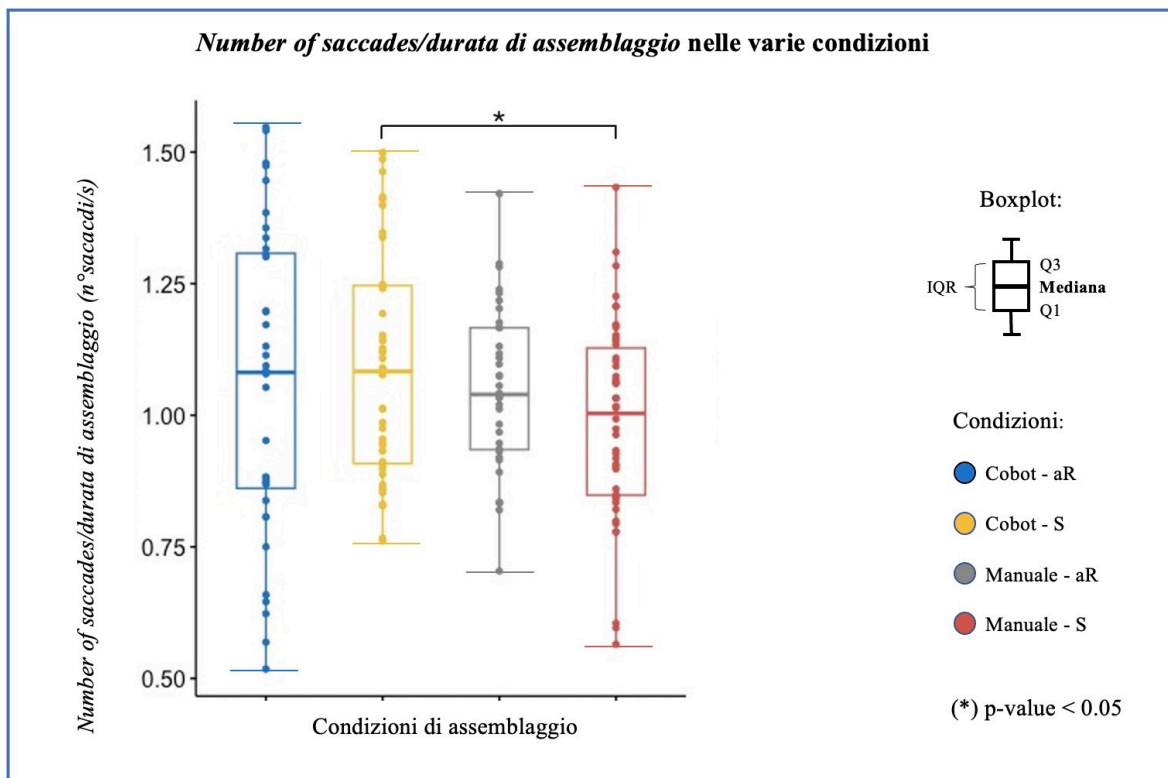


Figura 7.27 Confronto tra boxplot dei valori registrati di Number of saccades/durata assemblaggio nelle varie condizioni di assemblaggio

Il test riporta come differenza significativa il numero di saccadi tra le condizioni “C-S” e “M-S” (Figura 7.28). Ciò sembra rimarcare che l'uso del cobot riduce la necessità di consultare frequentemente lo schermo, diminuendo così il numero di saccadi e il carico cognitivo associato.

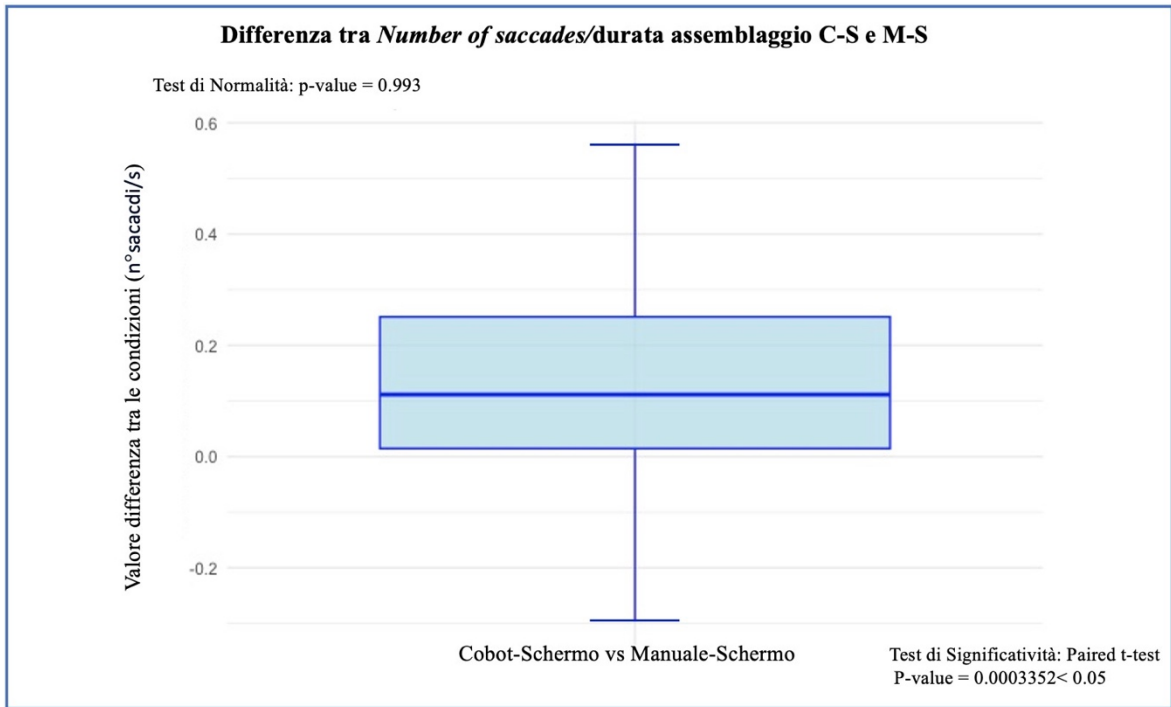


Figura 7.28 Boxplot dei valori differenza del *Number of saccades*/durata assemblaggio registrati nella condizione Cobot-Schermo e Manuale-Schermo. (In alto a sinistra) Valore di p-value risultante dal test di normalità. (In basso a destra) test di significatività usato e corrispondente valore di p-value

Di seguito è presentata la Tabella 7.1 di riepilogo di quanto osservato in questa sezione.

Variabile analizzata	Differenza analizzata	Distribuzione normale	p-value	Test statistico utilizzato	p-value
Average duration of whole fixations [s]	AR - S	SI	0,505	Paired t-test	0,201
	C - M	SI	0,14	Paired t-test	0,007*
	(C&AR) - (C&S)	SI	0,271	Paired t-test	0,165
	(C&AR) - (M&AR)	SI	0,0601	Paired t-test	0,037*
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,699	Paired t-test	0,061
Number of whole fixations/durata assemblaggio [n*fiss/s]	(C&S) - (M&S)	SI	0,298	Paired t-test	0,065
	AR - S	SI	0,994	Paired t-test	0,666
	C - M	SI	0,802	Paired t-test	0,003*
	(C&AR) - (C&S)	SI	0,839	Paired t-test	0,718
	(C&AR) - (M&AR)	SI	0,702	Paired t-test	0,118
Average whole fixation pupil diameter [mm]	(M&AR) - (M&S)	SI	0,832	Paired t-test	0,83
	(C&S) - (M&S)	SI	0,137	Paired t-test	0,002*
	AR - S	SI	0,467	Paired t-test	0,0002*
	C - M	NO	0,007	Wilcoxon signed rank test	0,336
	(C&AR) - (C&S)	NO	0,0056	Wilcoxon signed rank test	0,206
Number of saccades/durata assemblaggio [n*sacc/s]	(C&AR) - (M&AR)	NO	0,0068	Wilcoxon signed rank test	0,059
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,498	Paired t-test	0,0003*
	(C&S) - (M&S)	SI	0,873	Paired t-test	0,87
	AR - S	NO	0,0215	Wilcoxon signed rank test	0,655
	C - M	SI	0,684	Paired t-test	0,013*
Average peak velocity of saccades [°/s]	(C&AR) - (C&S)	SI	0,422	Paired t-test	0,263
	(C&AR) - (M&AR)	SI	0,646	Paired t-test	0,859
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,337	Paired t-test	0,057
	(C&S) - (M&S)	SI	0,993	Paired t-test	0,0003*
	AR - S	SI	0,068	Paired t-test	0,00006*
Average amplitude of saccades [°]	C - M	SI	0,108	Paired t-test	0,711
	(C&AR) - (C&S)	NO	0,037	Wilcoxon signed rank test	0,004*
	(C&AR) - (M&AR)	SI	0,206	Paired t-test	0,91
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,186	Paired t-test	0,005*
	(C&S) - (M&S)	NO	0,004	Wilcoxon signed rank test	0,226
Durata assemblaggio [s]	AR - S	SI	0,366	Paired t-test	0,0004741*
	C - M	SI	0,23	Paired t-test	0,8051
	(C&AR) - (C&S)	SI	0,519	Paired t-test	0,0001664*
	(C&AR) - (M&AR)	SI	0,272	Paired t-test	0,2094
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,19	Paired t-test	0,1666
SCL [μs]	(C&S) - (M&S)	SI	0,117	Paired t-test	0,27
	AR - S	NO	3,55E-09	Wilcoxon signed rank test	0,177
	C - M	NO	2,98E-10	Wilcoxon signed rank test	0,000000447*
	(C&AR) - (C&S)	SI	0,174	Paired t-test	0,547
	(C&AR) - (M&AR)	NO	0,013	Wilcoxon signed rank test	0,22
SCR [μs]	(M&AR) - (M&S)	NO	0,0005	Wilcoxon signed rank test	0,108
	(C&S) - (M&S)	SI	0,101	Paired t-test	0,008*
	AR - S	NO	9,66E-10	Wilcoxon signed rank test	0,11
	C - M	NO	3,36E-10	Wilcoxon signed rank test	0,955
	(C&AR) - (C&S)	NO	1,45E-06	Wilcoxon signed rank test	0,002*
	(C&AR) - (M&AR)	NO	3,58E-07	Wilcoxon signed rank test	0,008*
	(M&AR) - (M&S)	NO	0,0003	Wilcoxon signed rank test	0,166
	(C&S) - (M&S)	NO	3,95E-06	Wilcoxon signed rank test	0,041*
	AR - S	NO	1,94E-07	Wilcoxon signed rank test	0,136
	C - M	NO	9,47E-10	Wilcoxon signed rank test	0,766
	(C&AR) - (C&S)	NO	0,0003	Wilcoxon signed rank test	0,074
	(C&AR) - (M&AR)	NO	0,001	Wilcoxon signed rank test	0,171
	(M&AR) - (M&S)	SI	0,463	Paired t-test	0,52
	(C&S) - (M&S)	NO	0,0001	Wilcoxon signed rank test	0,423

Tabella 7.1 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dai test di normalità e test di significatività rispetto alle varie metriche oggettive prese in esame. In giallo sono evidenziate le coppie di condizioni la cui differenza risulta significativa statisticamente.

### 7.2.2. Misure soggettive (o valutazioni percettive): i questionari

Le misure soggettive (valutazioni percettive) del carico di lavoro mentale (Tabella 7.2) richiedono agli operatori di esprimere una loro personale valutazione in merito allo sforzo cognitivo richiesto per portare a termine un compito. La valutazione è compiuta solo dopo aver completato il compito stesso. Questo approccio è relativamente non invasivo, generalmente semplice da implementare, e gode di un notevole supporto teorico per la sua capacità di fornire misure sensibili del carico dell'operatore (Claxton Bommer, 2016).

Misure soggettive	
Pro	Contro
Semplicità di somministrazione	La somministrazione prevede che il compito si interrompa
Rapidità di somministrazione	Forma di misurazione discreta e non continua del <i>workload</i>
Bassi costi	Possibili <i>bias</i> sistematici nella risposta
Poco intrusive	
Generano risposte attendibili	

Tabella 7.2 Pro e contro delle misure soggettive

Nell'analisi dei dati che segue, è importante considerare l'influenza della cognizione inconscia dei partecipanti sui risultati ottenuti. Questo fenomeno naturale si manifesta soprattutto in presenza di compiti ripetitivi. La cognizione inconscia è definita come la "*struttura mentale e il processo che, operando al di fuori della consapevolezza fenomenica, influenza comunque le esperienze, i pensieri e le azioni cosce*" (Claxton Bommer, 1987). Un esempio tipico di cognizione inconscia è la guida di un'automobile. Nel contesto dell'assemblaggio presentato nell'esperimento, i tempi di esecuzione di ogni partecipante tendono a diminuire con il progredire delle prove. Questa riduzione, insieme alla diminuzione della necessità di consultare le istruzioni, può essere attribuibile alla cognizione inconscia. Tuttavia, durante l'esperimento, i partecipanti interrompono le prove per completare questionari o cambiare dispositivi. Queste pause implicano un parziale riavvio del processo di apprendimento e la variazione delle modalità di assemblaggio proposte loro, così come dei dispositivi a supporto, influenzando non poco l'approccio degli individui all'esecuzione degli assemblaggi. Nonostante queste interruzioni, è evidente che l'apprendimento progressivo porti a un miglioramento delle performance, evidenziato da tempi di assemblaggio ridotti e un minor numero di errori. Tuttavia, tale progresso non può essere esteso allo stress e al carico cognitivo analizzati. Infatti, alcuni partecipanti mostrano

un aumento dell'affaticamento e dello stress con l'aumentare del numero di assemblaggi completati.

Queste osservazioni sono cruciali per comprendere la complessità dell'apprendimento e dell'esecuzione dei compiti ripetitivi, nonché per sviluppare strategie che possano mitigare l'affaticamento e lo stress associati a tali attività.

I tre questionari di cui verranno analizzati i dati in seguito sono stati somministrati ai partecipanti al termine di ogni prova di assemblaggio.

### NASA-TLX

Il NASA-TLX (o “*National Aeronautics And Space Administration – Task Load Index*”) è il più comune strumento di valutazione soggettiva del carico di lavoro mentale.

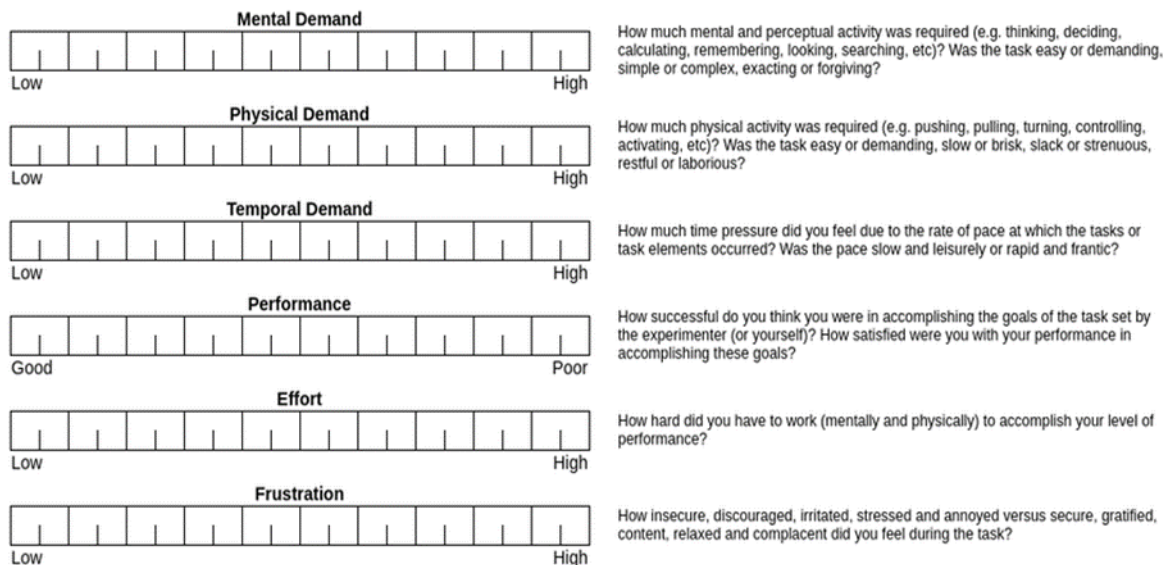


Figura 7.29 NASA-TLX utilizzato durante le prove sperimentali ([https://www.researchgate.net/figure/NASA-TLX-assessment-32\\_fig4\\_330747015](https://www.researchgate.net/figure/NASA-TLX-assessment-32_fig4_330747015))

Esso si pone quale strumento valutativo della percezione della domanda cognitiva da parte degli utenti, configurandosi come pertinente all'esame dell'usabilità, dell'efficacia e del *comfort* di un sistema. Il NASA-TLX adotta una scala multidimensionale offrendo una valutazione articolata del carico mentale e percettivo richiesto dall'attività svolta.

Il punteggio risultante è una media pesata di sei sottoscale (Hart & Staveland, 1988b), di cui i partecipanti dispongono di una breve descrizione (Figura 7.29):

1. *Mental demand*– misura se l'attività percettiva (es. pensare, guardare, cercare, ecc.) è stata facile o impegnativa;

2. *Physical demand*– misura se l'attività fisica (es. controllare, attivare, ecc.) è stata faticosa o rilassante;
3. *Temporal demand*– misura quanta pressione è stata percepita con il ritmo dell'attività (es. lento, veloce, frenetico, ecc.);
4. *Effort*– misura quanto è stato difficile il lavoro svolto per portare a termine il compito;
5. *Performance*– misura quanto il soggetto è stato soddisfatto della propria esecuzione dei compiti;
6. *Frustration*– misura come il soggetto si è sentito durante il compito (es. irritato, rilassato, stressato, ecc.).

La scala a intervalli misura sei dimensioni su un *range* da 0 a 100, dove 0 rappresenta il livello minimo di domanda del compito e 100 il livello massimo, con l'eccezione della dimensione della *performance*, dove 0 indica un'alta soddisfazione e 100 una bassa.

La Figura 7.30 rappresenta un'analisi delle dimensioni del carico di lavoro percepito durante le prove sperimentali utilizzando il NASA-TLX (Task Load Index).

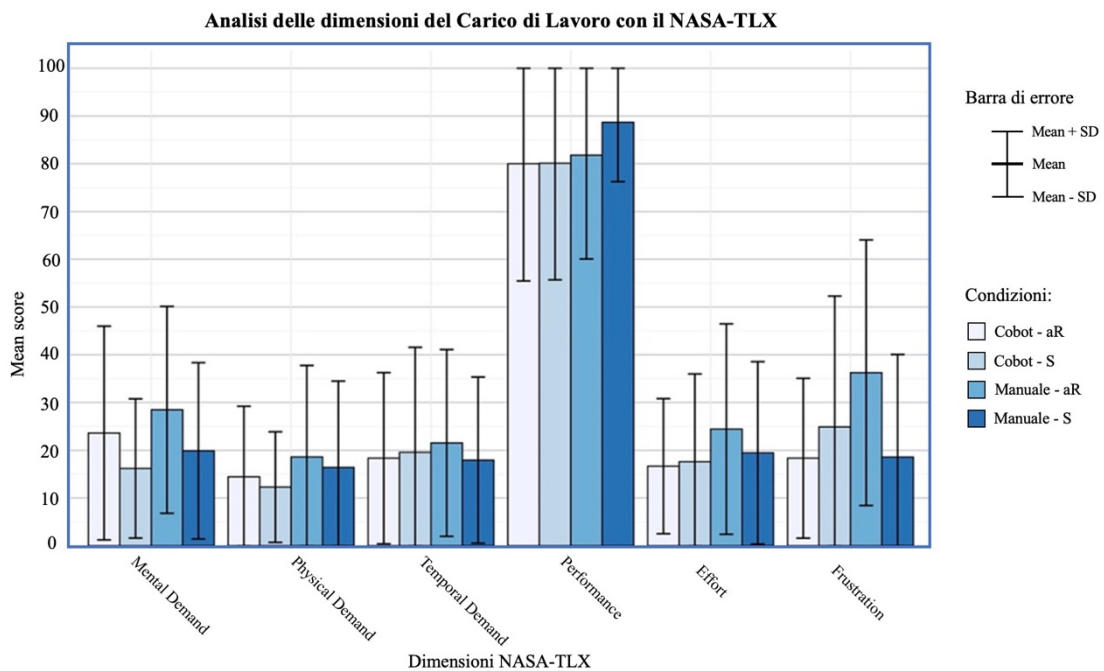


Figura 7.30 Dimensioni del carico di lavoro analizzate attraverso il NASA-TLX.



In particolare, il grafico presentato è un grafico a barre con barre di errore. Questo tipo di grafico è comunemente utilizzato per rappresentare dati che includono misure di dispersione, come la deviazione standard. Nel contesto del NASA-TLX, questo grafico permette di visualizzare le medie delle diverse dimensioni del carico di lavoro per ciascuna condizione sperimentale, insieme alla variabilità dei dati intorno alla media.

Attraverso le sei dimensioni che compongono tale questionario, si è potuto analizzare e valutare il carico di lavoro percepito dai partecipanti. Nel complesso, il grafico mostra che le condizioni che coinvolgono l'aR (siano esse inserite in un contesto di assemblaggio manuale o meno) tendono a presentare livelli più alti di frustrazione e sforzo, suggerendo che l'integrazione di aR può aumentare il carico di lavoro percepito. Tuttavia, le condizioni senza aR non mostrano una riduzione significativa della domanda mentale o fisica. Le ampie barre di errore in tutte le dimensioni indicano una grande variabilità nelle risposte dei partecipanti, sottolineando l'importanza di considerare le differenze individuali nella percezione del carico di lavoro.

### SUS

Il “*System Usability Scale*” (o SUS) è un questionario utilizzato per valutare l'*usability* di un prodotto o un sistema. È composto da 10 affermazioni a cui si risponde su una scala Likert a 5 punti che varia da “Fortemente in disaccordo” a “Fortemente d'accordo” (Brooke, 1996). Le affermazioni sono strutturate alternando quelle positive a quelle negative per due ragioni: in primo luogo, attraverso la previsione di un'unica medesima risposta dei partecipanti a tutte le domande, non viene data la possibilità a quest'ultimi di barare; in secondo luogo, si intende contrastare la naturale tendenza delle persone ad essere più inclini ad accordarsi con le affermazioni piuttosto che dissentire con esse. Il punteggio risultante varia da 0 a 100 (ad un valore alto si associa una migliore usabilità del sistema o prodotto). Per calcolare dato punteggio bisogna seguire un processo ben preciso che trasforma le risposte in valori numerici. È uno strumento che può essere implementato in poco tempo e con una certa facilità

([https://www.questionpro.com/blog/system-usability-scale/#:~:text=The%20System%20Usability%20Scale%20\(SUS\)%20is%20a%20questionnaire%20that%20is,systems%2C%20whether%20software%20or%20hardware\).](https://www.questionpro.com/blog/system-usability-scale/#:~:text=The%20System%20Usability%20Scale%20(SUS)%20is%20a%20questionnaire%20that%20is,systems%2C%20whether%20software%20or%20hardware).)

Per calcolare il SUS *score* (Figura 7.31) si è seguito un procedimento ben preciso per trasformare le risposte dei partecipanti in un certo valore numerico.

System Usability Scale (SUS) \*

	Fortemente in disaccordo	In disaccordo	Indeciso	D'accordo	Fortemente d'accordo
Penso che mi piacerebbe utilizzare spesso questo sistema.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ho trovato il sistema inutilmente complesso	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ho trovato il sistema facile da usare	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Penso che avrei bisogno del supporto di un tecnico per poter utilizzare il sistema.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trovo che le varie funzioni di questo sistema siano ben integrate.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ritengo che il sistema sia troppo incoerente.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Immagino che la maggior parte delle persone imparerrebbe a usare questo sistema molto rapidamente.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ho trovato il sistema molto complicato da usare	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mi sono sentito molto sicuro nell'uso del sistema	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ho dovuto imparare molte cose prima di poter utilizzare il sistema.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 7.31 Questionario SUS somministrato ai partecipanti all'esperimento

Tale procedimento segue le linee guida presentate da Brooke (1996) in cui si afferma che risulta necessario trasformare i punteggi delle risposte per standardizzare le valutazioni dei partecipanti e ottenere una misura coerente di usabilità. In primo luogo, si è associato ad ogni risposta un punteggio che va da 1 a 5 in base alla posizione che la stessa risposta occupa sulla scala Likert. Lo step successivo ha previsto:

- Per le risposte dispari (ma formulate in modo positivo o “*positively phrased*”) si è sottratto 1 dalla risposta, ma nella pratica è come se la scala passasse dall’essere [1-5] a [0-4] (Figura 7.32).

	Fortemente in disaccordo			Fortemente d'accordo	
	1	2	3	4	5
-1	0	1	2	3	4

Figura 7.32 Procedimento seguito nel caso in cui si processano le risposte dispari del SUS

- Per le risposte pari (ma formulate in modo negativo o “*negatively phrased*”) il disaccordarsi con esse è positivo. Motivo per cui, per dare un alto punteggio al disaccordo, si è sottratto da 5 il valore della risposta data. Nella pratica (Figura 7.33):

		Fortemente in disaccordo			Fortemente d'accordo	
	$x_i$	1	2	3	4	5
$5-x_i$		4	3	2	1	0

Figura 7.33 Procedimento seguito nel caso in cui si processano le risposte pari del SUS

La traslazione dei punteggi ha lo scopo di mantenere la coerenza tra le affermazioni positive e quelle negative, garantendo così che un punteggio più alto rappresenti una migliore usabilità complessiva (Brooke, 1996). Seguendo i passaggi di cui sopra ogni questionario totalizza un range di punteggio che va da 0 a 40. Ma per ottenere un range da 0 a 100 si è moltiplicato ogni SUS score ottenuto per 2,5. Riportare i valori in una scala siffatta è necessario per rendere il punteggio complessivo intuitivo e facilmente interpretabile, in quanto risulta essere una scala più comunemente utilizzata e compresa rispetto a una scala da 0 a 40. La scala da 0 a 100 consente, inoltre, un confronto più semplice tra le diverse valutazioni di usabilità registrate.

Il grafico a barre con barre di errore (Figura 7.34) mostra i punteggi del SUS per le diverse condizioni di assemblaggio dell'esperimento.

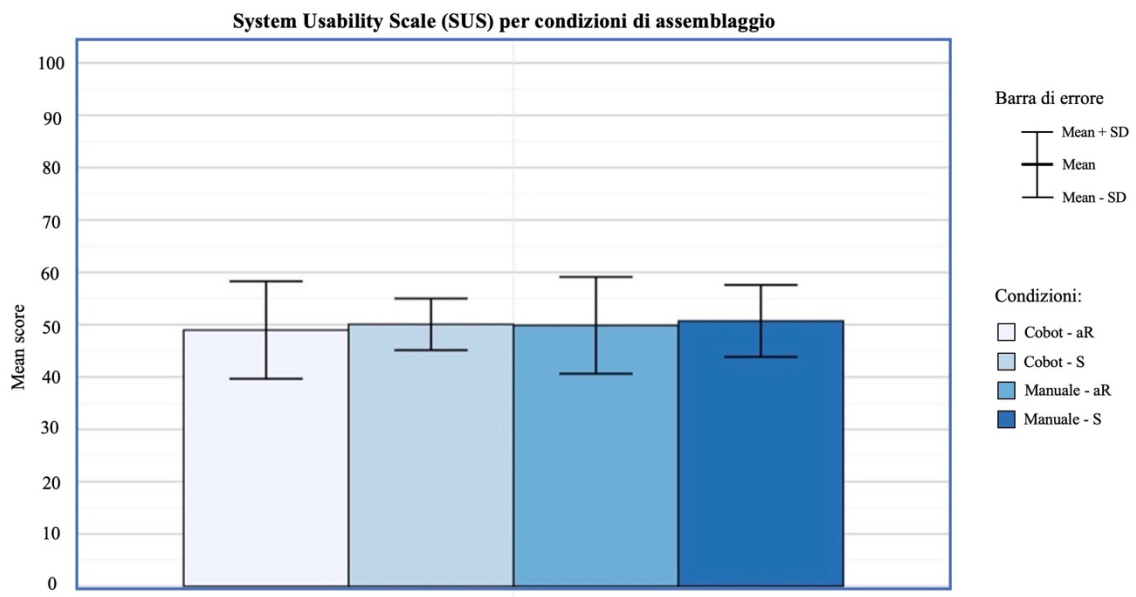


Figura 7.34 Grafico a barre con barre di errore dei punteggi medi del SUS riscontrati per ogni condizione di assemblaggio

I punteggi medi tra le diverse condizioni variano leggermente, ma si mantengono tutti intorno a un range di [45-55], indicando una percezione dell'usabilità piuttosto uniforme tra le condizioni testate. Anche l'ampiezza delle barre di errore è abbastanza consistente tra le condizioni, suggerendo una variabilità simile nella percezione dell'usabilità per ogni condizione. Poiché i punteggi si mantengono uniformi tra le quattro condizioni di assemblaggio, non ci sono differenze significative nella percezione dell'usabilità tra l'uso di Cobot, aR, e Schermo durante l'assemblaggio. Nonostante i punteggi SUS non siano estremamente elevati, tutte le condizioni registrano punteggi medi che si collocano nella fascia media, suggerendo che ci siano margini di miglioramento per l'usabilità percepita dei sistemi testati.

## SAM

Il SAM (o “*Self-Assessment Manikin*”) è uno strumento tipicamente usato per misurare la risposta emotiva in relazione ad un evento o una situazione. Il SAM si basa sul modello di stato emotivo PAD (*Pleasure, Arousal, Dominance*) per descrivere e misurare tutte le emozioni (Bradley M. M., & Lang, P. J., 1994). È una scala pittorica non verbale composta da tre file di pittogrammi, ognuna delle quali utilizza un diagramma stilizzato per mostrare una scala a cinque punti in ciascuno dei domini (Figura 7.35).

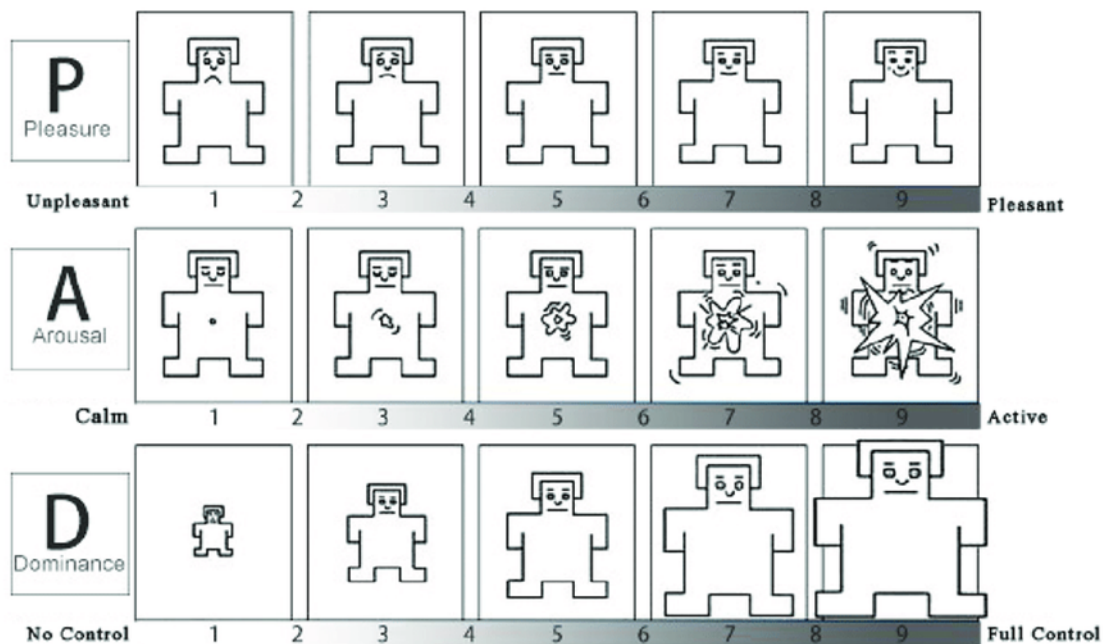


Figura 7.35 SAM ([https://www.researchgate.net/figure/Self-Assessment-Manikin-SAM-Scale-36-The-numbers-in-the-figure-represent-the-scoring\\_fig1\\_354605335](https://www.researchgate.net/figure/Self-Assessment-Manikin-SAM-Scale-36-The-numbers-in-the-figure-represent-the-scoring_fig1_354605335))

Lo stato emotivo è valutato attraverso tre dimensioni:

- *Valence*: descrive il sentimento positivo o negativo causato da una situazione o un evento. Ad esempio, si suppone che la rabbia e l'ansia abbiano una valenza negativa, mentre la gioia una valenza positiva;
- *Arousal*: rappresenta l'intensità di un'emozione, riconducibile al grado di eccitamento. Stati di agitazione si suppongono riconducibili a un "arousal" alto, come ad esempio paura, ansia, sorpresa, gioia o euforia. Al contrario, stati di rilassatezza sono caratterizzati da un "arousal" basso;
- *Dominance*: descrive quanto ci si sente in controllo di una situazione (senso di dominio/sicurezza). Un manichino piccolo rappresenta la sensazione di non avere il

potere di gestire la situazione. Ad esempio, stati emotivi come paura e ansia sono caratterizzati da "*dominance*" basso, mentre il rilassamento da "*dominance*" alto

In Figura 7.36 è rappresentato il grafico a barre con *error barr* contenente i punteggi medi dei SAM per le diverse condizioni di assemblaggio. Rispetto ai questionari descritti in precedenza, il SAM impiega una scala ordinale per misurare le emozioni attraverso pittogrammi stilizzati. Motivo per cui viene utilizzata la mediana, e non la media, per determinare lo *score*. In particolare, i partecipanti hanno percepito tutte le condizioni di assemblaggio come piuttosto piacevoli, senza differenze significative tra le diverse configurazioni. La bassa eccitazione suggerisce che l'attività di assemblaggio non ha suscitato un'intensa attivazione emozionale.

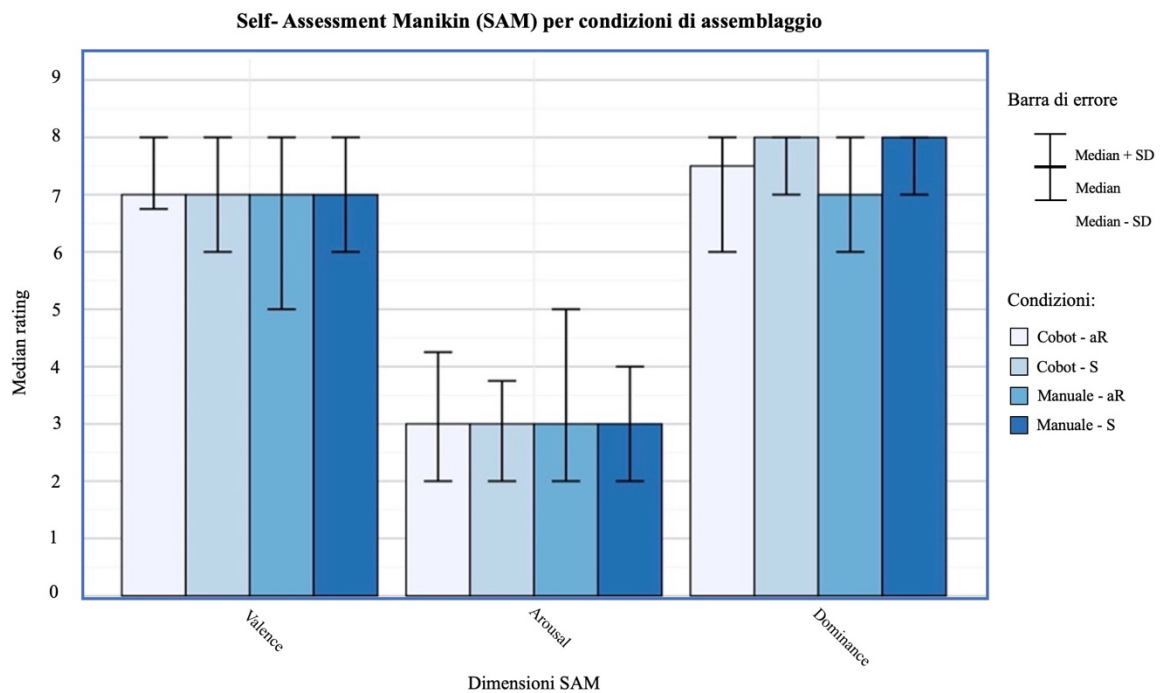


Figura 7.36 Grafico a barre con barre di errore delle dimensioni del SAM riscontrate nelle varie condizioni di assemblaggio

La variabilità indica che alcuni partecipanti potrebbero aver trovato l'esperienza più eccitante di altri, ma in generale, l'attività non è stata percepita come molto stimolante. L'alto punteggio di dominanza suggerisce che i partecipanti si sono sentiti in controllo durante l'attività di assemblaggio, indipendentemente dalla configurazione. Questo è un indicatore positivo, poiché sentirsi in controllo può contribuire a una migliore esperienza complessiva.

### 7.2.3. Errori di processo

Secondo (S.Miller, 2001) le misure di performance sono strumenti in grado di stimare il carico cognitivo. In particolare, gli errori commessi durante l'esecuzione di un compito sono specchio dell'efficienza dell'operatore. Ma soprattutto, tale misura comportamentale appare utile a comprendere se vi è o meno sovraccarico cognitivo. Difatti, il sovraccarico cognitivo potrebbe comportare nell'operatore una difficoltà a mantenere alta l'attenzione e a concentrarsi sul compito da svolgere. Gli errori di processo rappresentano indicatori preziosi per comprendere le difficoltà incontrate dai partecipanti durante l'esecuzione di un compito o anche per rivelare lacune nella comprensione delle istruzioni stesse.

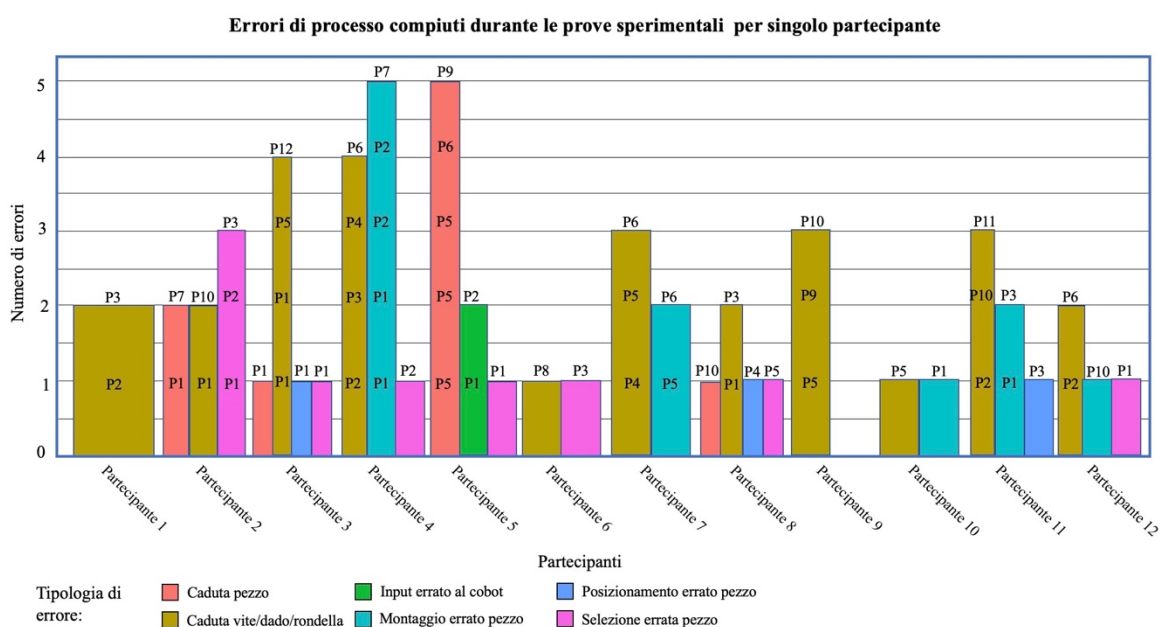
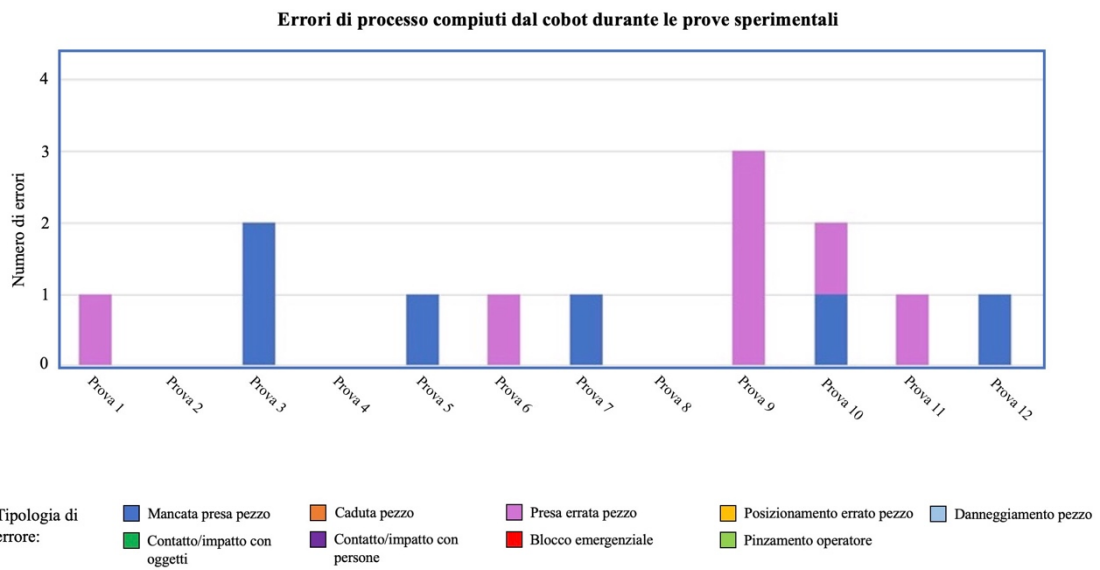


Figura 7.37 Numero di errori compiuti dai partecipanti con annessa prova in cui sono stati rilevati

In Figura 7.37 sono rappresentati le varie tipologie di errori di processo compiuti da ciascun partecipante durante le prove sperimentali. Ciò che si evidenzia è che la “Caduta vite/dado/rondella” sia la tipologia di errore più comune.

In Figura 7.38 sono presentati gli errori compiuti dal cobot. I comuni risultano essere “Mancata presa pezzo” e “Presa errata pezzo”. Il più delle volte questi errori si sono manifestati in quanto i partecipanti muovevano la piastra su cui erano poggiati i componenti, destabilizzando la posizione di quest’ultimi.



*Figura 7.38 Errori compiuti dal cobot per prova di assemblaggio*



## 8. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa Tesi è stato comprendere l'effetto dell'integrazione di tecnologie avanzate, come il cobot e la Realtà Assistita, in un'attività di assemblaggio che potesse somigliare quanto più possibile a ciò che è presente all'interno delle linee di assemblaggio industriali. Attraverso l'esperimento implementato si è avuta l'occasione di raccogliere dati significativi per analizzare la risposta dei partecipanti alle condizioni proposte loro, risposte in termini di carico cognitivo, prestazioni effettuate e percezioni soggettive degli stessi.

Le analisi delle risposte fisiologiche (ottenute attraverso gli strumenti Tobii Pro Glasses 3 ed Empatica E4) e dei questionari soggettivi hanno evidenziato come l'integrazione dei cobot e dell'aR al *setup* dell'assemblaggio influenzino significativamente il carico cognitivo degli operatori. Le condizioni di assemblaggio con l'ausilio del cobot e dell'aR hanno mostrato una riduzione del carico cognitivo rispetto alle configurazioni solo manuali e con schermo. Questo risultato è confermato dalla minor SCL registrato in tali configurazioni d'assemblaggio, così come dai valori più alti dell'*Average duration of whole fixations* nelle condizioni di assemblaggio manuali. Tuttavia, la presenza dell'aR, pur riducendo l'affaticamento fisico, ha aumentato la frustrazione e lo sforzo percepito, come indicato dai punteggi del NASA-TLX.

L'integrazione dell'aR non ha mostrato un vantaggio chiaro in termini di riduzione del tempo di assemblaggio, suggerendo che i partecipanti potrebbero aver avuto bisogno di un periodo di adattamento più lungo alla tecnologia.

Il *System Usability Scale* (SUS) ha fornito una valutazione complessivamente positiva dell'usabilità delle diverse configurazioni tecnologiche, sebbene non vi siano state differenze significative tra le condizioni. Questo indica che, nonostante le variazioni nel carico cognitivo e nelle prestazioni, le tecnologie implementate sono state percepite come ugualmente utilizzabili dai partecipanti.

L'analisi delle risposte emotive tramite il Self-Assessment Manikin (SAM) ha rivelato che tutte le condizioni di assemblaggio sono state percepite come piacevoli e sotto controllo, senza differenze significative tra le configurazioni. Questo suggerisce che l'introduzione di cobot e aR non ha influenzato negativamente l'esperienza emotiva degli operatori, mantenendo un alto livello di accettabilità delle nuove tecnologie.

I risultati ottenuti da questo studio forniscono indicazioni utili per l'implementazione di tecnologie avanzate in contesti manifatturieri. L'uso del cobot ha dimostrato di migliorare l'efficienza e ridurre il carico cognitivo ma di contro richiede una precisa configurazione che lo rende limitato per compiti che richiedono alta variabilità e complessità. Inoltre, l'integrazione dell'aR alle attività di assemblaggio necessita di ulteriori miglioramenti per massimizzare i benefici percepiti dagli operatori.

La sperimentazione effettuata è stata compiuta su un numero di partecipanti limitato, il che potrebbe aver generato dei risultati non rappresentativi per i casi reali. In aggiunta, il periodo di adattamento all'uso del cobot così come per il dispositivo RealWear potrebbe essere stato non sufficiente per alcuni partecipanti, influenzando negativamente le loro percezioni e prestazioni. Nonostante gli sforzi per creare un *setup* quanto più simile al vero, le condizioni sperimentali potrebbero non aver replicato perfettamente le situazioni reali di un ambiente di lavoro industriale, limitando l'applicabilità diretta dei risultati.

In conclusione, sebbene questa ricerca abbia evidenziato vantaggi significativi nell'uso dei cobot, l'integrazione dell'aR richiede ulteriori studi per ottimizzare la sua applicazione. È probabile che sviluppi futuri nella tecnologia aR e nella progettazione di interfacce utente possano migliorare ulteriormente l'usabilità e ridurre il carico cognitivo associato. Le industrie e l'intero sistema manifatturiero devono investire nella formazione degli operatori, di modo che qualsiasi nuova tecnologia venga accolta positivamente. Questi temi meritano sicuramente maggiore approfondimento e continueranno ad evolversi, contribuendo a creare ambienti di lavoro più efficienti e sostenibili. Si auspica che un giorno vengano condotti sempre più studi trasversali nei vari campi di ricerca, generando maggiore comprensione dei temi trattati in questa Tesi.

L'industria manifatturiera deve continuare a investire nella ricerca e nello sviluppo di queste tecnologie per garantire che gli operatori possano trarre il massimo vantaggio dalla loro introduzione. Si potrebbero, ad esempio, introdurre dei sensori avanzati utili al monitoraggio *realtime* delle condizioni psicofisiche in cui versano gli operatori per una data condizione d'assemblaggio, adattando dinamicamente il supporto tecnologico in base alle loro esigenze. Solo attraverso una continua innovazione e adattamento sarà possibile raggiungere risultati ancora più significativi e migliorare le condizioni di lavoro degli operatori.

## Glossario

**Computer Vision:** ramo dell'Intelligenza Artificiale (IA) focalizzato sull'abilità dei sistemi computazionali di estrarre informazioni rilevanti da fonti visive quali immagini digitali e video. Tale disciplina si propone di consentire ai computer di condurre analisi avanzate su dati visivi al fine di formulare segnalazioni e intraprendere azioni in risposta a tali informazioni.

**Offset visivo:** disallineamento tra la posizione attesa e quella percepita di oggetti o punti di riferimento nel campo visivo, che influenza la percezione spaziale e il corretto allineamento visivo. Nei sistemi di realtà aumentata (AR) o virtuale (VR), l'offset può avere luogo se gli elementi virtuali sovrapposti al mondo reale o simulato non sono allineati correttamente con la percezione naturale dell'utente.

**Payload:** (“capacità di carico”) indica il carico massimo sopportabile da un macchinario, ovvero dal cobot. È una specifica tecnica propria di ogni cobot.

**Sbraccio:** massima estensione dal braccio del cobot nello spazio tridimensionale.

**Caratteristiche visive:** oggetti virtuali utilizzati per rappresentare informazioni sullo schermo.

**Parte attiva** (di un pezzo meccanico): porzione del componente che svolge direttamente la funzione principale per cui il pezzo è stato progettato. Questo può includere superfici di contatto, elementi di serraggio, taglienti, o qualsiasi altro segmento che interagisce con altri componenti o materiali per eseguire il lavoro previsto, come la trasmissione di forza, il taglio, la perforazione, o la movimentazione di parti.

**Interfaccia grafica (o GUD):** permette agli utenti di interagire con il sistema in modo intuitivo, sfruttando rappresentazioni grafiche (come finestre, icone e pulsanti) o caratteristiche visive per rendere le operazioni più accessibili e comprensibili rispetto alle interfacce basate su comandi testuali.

## Bibliografia

- Agrawala M., Phan D., Heiser J., Haymaker J., Klingner J., Hanrahan P., & Tversky B. (2003). Designing effective step-by-step assembly instructions. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 828–837.
- Alkan, B. (2019). An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(3), 1145–1157. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00556-9>.
- Ali, M. (2012). *Contribution to decisional human-robot interaction: towards collaborative robot companions* (Doctoral dissertation). <https://theses.hal.science/tel-00719684>
- Alves, J., Lima, T. M., & Gaspar, P. D. (2023). Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review. In *Processes* (Vol. 11, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr11010193>
- Andrews, D. C. (2001). Technical communication in the global community (2nd ed.). *Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall* .
- Arents, J., Abolins, V., Judvaitis, J., Vismanis, O., Oraby, A., & Ozols, K. (2021). Human–robot collaboration trends and safety aspects: A systematic review. In *Journal of Sensor and Actuator Networks* (Vol. 10, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jsan10030048>
- Barravecchia, F., Bartolomei, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023). Redefining Human–Robot Symbiosis: a bio-inspired approach to collaborative assembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(5–6), 2043–2058. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11920-1>
- Bergstrom, J. R., & Shall, A. J. (2014). *Eye Tracking in User Experience Design*. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann
- Bibby, P. A., & Payne, S. J. (1993). Internalization and the use specificity of device knowledge. *Human-Computer Interaction*, 25–56.
- Boothroyd G., Dewhurst P., & Knight W.A. (2010). Product design for manufacture and assembly, 3rd edition. *Boca Raton, FL: CRC Press*.

- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the Self-Assessment Manikin and the Semantic Differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49-59.
- Bratman, M. E. (1992). Shared Cooperative Activity. In *Source: The Philosophical Review* (Vol. 101, Issue 2). <https://www.jstor.org/stable/2185537>.
- Brooke, J. (n.d.). *SUS-a quick and dirty usability scale*. <https://www.researchgate.net/publication/319394819>.
- Capponi, M., Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2024a). Assembly complexity and physiological response in human-robot collaboration: Insights from a preliminary experimental analysis. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102789>
- Capponi, M., Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2024b). Assessing perceived assembly complexity in human-robot collaboration processes: a proposal based on Thurstone's law of comparative judgement. *International Journal of Production Research*, 62(14), 5315–5335. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2291519>
- Carroll, J. M. (1990). The Nurnberg funnel: Designing minimal-ist instruction for practical computer skill . *Cambridge, MA: MIT Press*.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293–332. [https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804\\_2](https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2)
- Clark, H. H. (2005). Coordinating with each other in a material world. *Discourse Studies*, 7(4–5), 507–525. <https://doi.org/10.1177/1461445605054404>
- Claxton Bommer, S. (2016). *A Theoretical Framework for Evaluating Mental Workload A Theoretical Framework for Evaluating Mental Workload Resources in Human Systems Design for Manufacturing Resources in Human Systems Design for Manufacturing Operations Operations*. [https://corescholar.libraries.wright.edu/etd\\_all](https://corescholar.libraries.wright.edu/etd_all)
- Cohen, Y., Shoval, S., & Faccio, M. (2019). Strategic view on cobot Deployment in Assembly 4.0 systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1519–1524. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.415>
- D. Norman. (1988). The design of everyday things. *Psychol Everyday Things*.

- Dorloh, H., Li, K. W., & Khaday, S. (2023). Presenting Job Instructions Using an Augmented Reality Device, a Printed Manual, and a Video Display for Assembly and Disassembly Tasks: What Are the Differences? *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042186>
- D.W.F. van Krevelen and R. Poelman. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1-20.
- Eiriksdottir, E., & Catrambone, R. (2011). Procedural Instructions, Principles, and Examples. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(6), 749–770. <https://doi.org/10.1177/0018720811419154>
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. In *Robotics and Autonomous Systems* (Vol. 116, pp. 162–180). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
- Fadwa Mahiri, Aouatif Najoua, Souad Ben Souda, & Najia Amini. (2023). From Industry 4.0 to Industry 5.0: The Transition to Human Centricity and Collaborative Hybrid Intelligence. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 50(4). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.50.4.8>
- Farkas, D. K. (1999). The logical and rhetorical construction of procedural discourse. *Technical Communication*, 46(1), 42–54.
- Fite-Georgel, P. (2011). Is there a reality in Industrial Augmented Reality? *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 201–210. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092387>
- Galín, R. R., & Meshcheryakov, R. V. (2020). *Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration* (pp. 55–63). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_5)
- Ganier, F. (2004). Factors Affecting the Processing of Procedural Instructions: Implications for Document Design. *IEEE Transactions on Professional Communication*, 47(1), 15–26. <https://doi.org/10.1109/TPC.2004.824289>
- Gawron V. J. (2008). Human Performance, Mental Workload and Situational Awareness Measures Handbook. *London: CRC Press*.

- Gaz, C., Magrini, E., & De Luca, A. (2018). A model-based residual approach for human-robot collaboration during manual polishing operations. *Mechatronics*, *55*, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.014>
- Gervasi, R., Barravecchia, F., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023). Applications of affective computing in human-robot interaction: State-of-art and challenges for manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *237*(6–7), 815–832. <https://doi.org/10.1177/09544054221121888>
- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2020). A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *108*(3), 841–865. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05363-1>
- Goodrich MA, & Schultz AC. (2007). Human-robot interaction: a survey Foundations and trends in human-computer interaction. *Now,Boston*, *1*(3), 203-275.
- G.R. Bieger, & M.D. Glock. (1985). Comprehending spatial and contextual information in picture-text instructions. *J. Expe. Educ.*, *54*, 181–188.
- Harriott, C. E., Buford, G. L., Adams, J. A., & Zhang, T. (2015a). Measuring Human Workload in a Collaborative Human-Robot Team. *Journal of Human-Robot Interaction*, *4*(2), 61. <https://doi.org/10.5898/jhri.4.2.harriott>
- Harriott, C. E., Buford, G. L., Adams, J. A., & Zhang, T. (2015b). Measuring Human Workload in a Collaborative Human-Robot Team. *Journal of Human-Robot Interaction*, *4*(2), 61. <https://doi.org/10.5898/jhri.4.2.harriott>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research* (pp. 139–183). [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hoffman G., & Breazeal C. (2004). Collaboration in human-robot teams. *In Proceedings of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference*, 1–18.
- Ikeuchi K., & Suehiro T. (1992). *Towards an assembly plan from observation. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation.*
- J. R. Anderson. (1983). *The Architecture of Cognition. Cambridge,MA: Harvard University Press.*

- Laviola, E., Uva, A. E., & Gattullo, M. (2024). The minimal AR authoring approach: Validation in a real assembly scenario. *Computers in Industry*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104026>
- Loch, F., Quint, F., & Brishtel, I. (2016). Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly. *2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, 147–150. <https://doi.org/10.1109/IE.2016.31>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019a). Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review. In *Robotics* (Vol. 8, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). <title>Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum</title>. *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, 2351, 282–292. <https://doi.org/10.1117/12.197321>
- Müller, S. L., Stiehm, S., Jeschke, S., & Richert, A. (2017). Subjective Stress in Hybrid Collaboration. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10652 LNAI, 597–606. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70022-9\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70022-9_59)
- Nachreiner, F. (1995). Standards for ergonomics principles relating to the design of work systems and to mental workload. *Applied Ergonomics*, 26(4), 259–263. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00029-C](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00029-C)
- Neumann U., & Majoros A. (1998). *Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance*. 1–8.
- Nof S. Y., Wilhelm W. E., & Warnecke H. J. (1997). *Industrial assembly*. Chapman & Hall: London, UK.
- Onnasch, L., & Roesler, E. (2021). A Taxonomy to Structure and Analyze Human–Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*, 13(4), 833–849. <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00666-5>
- Othman, U., & Yang, E. (2023). *Publicato: 17 giugno 2023*. <https://doi.org/10.3390/https>
- Radkowski, R., Herrema, J., & Oliver, J. (2015). Augmented Reality-Based Manual Assembly Support With Visual Features for Different Degrees of Difficulty. *International*



*Journal of Human-Computer Interaction*, 31(5), 337–349.  
<https://doi.org/10.1080/10447318.2014.994194>

Schmidtler, J., Knott, V., Hölzel, C., & Bengler, K. (2015). Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future. *Occupational Ergonomics*, 12(3), 83–95. <https://doi.org/10.3233/OER-150226>

Scholtz J. (2003). Theory and evolution of human robot interactions. *In Proceedings of the IEEE 36th International Conference on System Sciences*, 5, 125–134.

Schöttle, A., Haghsheno, S., & Gehbauer, F. (2014). *Defining Cooperation and Collaboration in the Context of Lean Construction*. 22<sup>nd</sup> Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 1269-1280.

Segura, P., Lobato-Calleros, O., Ramírez-Serrano, A., & Soria, I. (2021). Human-robot collaborative systems: Structural components for current manufacturing applications. In *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* (Vol. 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100060>

S.Miller. (2001). Workload measures. *National Advanced Driving Simulator*, University of Iowa. <https://www.nads-sc.uiowa.edu/publications.php?specificPub=N2001-006>

Springmeyer R., Blattner M., & Max N. (1992). A characterization of the scientific data analysis process. *Proceedings of the IEEE Visualisation Conference*, 235–242. IEEE Computer Society Press

Stork, S., & Schubö, A. (2010). Human cognition in manual assembly: Theories and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 24(3), 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.05.010>

Sudha, S., Keshav Kolla, V., Sanchez, A., & Plapper, P. (2021). *Comparing effectiveness of paper based and Augmented Reality instructions for manual assembly and training tasks*. Proceedings of the 11th Conference on Learning Factories (CLF 2021). <https://ssrn.com/abstract=3859970>

Suzuki, R., Karim, A., Xia, T., Hedayati, H., & Marquardt, N. (2022, April 29). Augmented Reality and Robotics: A Survey and Taxonomy for AR-enhanced Human-Robot Interaction and Robotic Interfaces. *Conference on Human Factors in Computing Systems – Proceedings*, (pp. 1-33) <https://doi.org/10.1145/3491102.3517719>

- Tang A., Owen C., Biocca F., & Mou W. (2003). *Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly*. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 73–80.
- Tory M., Kirkpatrick A., Atkins S., & Möller T. (2006). Visualization task performance with 2D, 3D and combined displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12 (1), 2–13.
- T.P. Caudell; D.W. Mizell. (1992). *Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes*. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences* (Vol. 2, pp. 659–669). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- Vicentini, F. (2020). Terminology in safety of collaborative robotics. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 63). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101921>
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- Weiss, A., Wortmeier, A.-K., & Kubicek, B. (2021). Cobots in Industry 4.0: A Roadmap for Future Practice Studies on Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 51(4), 335–345. <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3092684>
- Wiedenmaier S., Oehme O., Schmidt L., & Luczack H. (2003). *Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation*. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 16(3), 497-514. [https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1603\\_8](https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1603_8)
- Wolfe J., & Horowitz T. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, 1745–1767.
- Wright, P., Creighton, P., & Threlfall, S. M. (1982). Some factors determining when instructions will be read. *Ergonomics*, 25, 225–237.
- Zhang, C., Wang, Z., Zhou, G., Chang, F., Ma, D., Jing, Y., Cheng, W., Ding, K., & Zhao, D. (2023). Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review. In *Advanced Engineering Informatics* (Vol. 57). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102121>

## **Sitografia**

<https://my.liuc.it/MatSup/2017/A78602/Lez02Noè%20%20%20Sistemi%20di%20assemblaggio.pdf>

[https://www.youtube.com/watch?v=qR0e5mU\\_RBs](https://www.youtube.com/watch?v=qR0e5mU_RBs)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Self-Assessment\\_Manikin](https://en.wikipedia.org/wiki/Self-Assessment_Manikin)

[https://www.youtube.com/watch?v=UMv\\_OW9\\_\\_qY](https://www.youtube.com/watch?v=UMv_OW9__qY)

<https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3>

<https://www.realwear.com>

<https://blog.amaxperteye.com/what-is-assisted-reality-here-is-what-you-need-to-know>

[https://www.jmp.com/it\\_it/statistics-knowledge-portal/t-test/paired-t-test.html](https://www.jmp.com/it_it/statistics-knowledge-portal/t-test/paired-t-test.html)

