

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

# Realtà Virtuale immersiva per l'auto-apprendimento nell'ambito della robotica industriale

Relatore prof. Fabrizio Lamberti Candidato

Anna Francavilla matricola: 220662

Sessione di laurea Aprile 2020

# Sommario

La Realtà Virtuale immersiva (o Virtual Reality, VR) è giunta alla maturità tecnologica necessaria per permettere di sperimentarne l'utilizzo nell'ambito di molteplici contesti.

Uno degli ambiti le cui esigenze di innovazione trovano nella VR uno strumento dal grande potenziale è quello della formazione intesa in senso ampio, da quella scolastica all'addestramento di personale addetto a mansioni in contesti pericolosi, industriali e non.

La VR è potenzialmente efficace nell'apprendimento perché fornisce la possibilità di immergere gli utenti in simulazioni fedeli di contesti reali, in ambienti che essi stessi possono modificare con le proprie azioni, e di erogare le informazioni in modi molto diversi da quelli utilizzati fino ad ora. Il miglioramento costante dell'ergonomia delle sue interfacce, unita alla loro versatilità, ne permette l'applicazione in un gran numero di situazioni.

Il lavoro di tesi si è inserito in questo contesto, avendo come obiettivo l'esplorazione delle possibilità che la VR può offrire all'innovazione della formazione del personale in ambito industriale, specificamente in quello della robotica industriale.

Si è iniziato con lo studio dello stato dell'arte della VR applicata all'apprendimento ed alla formazione, parallelamente a quello del contesto applicativo. In questa fase ha avuto un ruolo fondamentale la collaborazione con KUKA, azienda leader a livello mondiale nella produzione di robot industriali, perché si è avuta la possibilità di assistere allo svolgimento di uno dei corsi di programmazione robot che l'azienda periodicamente eroga agli operatori che utilizzano i suoi manipolatori robotici.

Si è potuto mantenere uno scambio continuo con i suoi formatori anche nelle fasi successive della tesi, in cui è stata ideata e realizzata un'applicazione VR per l'auto-apprendimento da parte di personale non qualificato di una delle procedure che vengono affrontate durante il corso.

Infine, per verificare l'efficacia che una formazione eseguita esclusivamente in VR, con l'ausilio dell'applicazione sviluppata, ed in auto-apprendimento,

cioè senza il supporto da parte di personale esperto durante la formazione, possa avere nel preparare gli utenti all'esecuzione delle procedure su un robot reale, sono stati condotti dei test sperimentali presso la sede dell'azienda.

# Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Lamberti per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di tesi, in cui ho imparato molto, e per avermi seguito con costanza in tutte le fasi insieme all'Ing. F. Gabriele Pratticò, che mi ha anche supportato molto nella progettazione e nella delicata fase dei test sperimentali.

Ringrazio lo staff di KUKA per tutto il supporto logistico, tecnico ed umano, la disponibiltà che hanno costantemente dimostrato e l'impegno profuso per garantire la realizzazione dei test sperimentali. Il ringraziamento va in particolare all'Ing. Alberto Pennetta, all'Ing. Ivano Garino e all'Ing. Chiara De Leonardis.

Ringrazio l'Ing. Davide Calandra per il suo supporto tecnico essenziale in fase di realizzazione ed Edoardo Demuru, che sebbene abbia lavorato ad un'altra tesi ha condiviso con me le gioie e i momenti difficili degli ultimi mesi di questo percorso.

# Indice

El	enco	delle figure	9
1	Intr	oduzione 1	L 1
	1.1	Motivazioni	11
	1.2		11
	1.3	Organizzazione dei contenuti	12
2	Stat	o dell'arte	13
	2.1	Realta Virtuale	13
		2.1.1 Tecnologie per la Realtà Virtuale	14
		2.1.2 Realtà Virtuale Immersiva	16
	2.2		18
		2.2.1 Motivazioni	18
		2.2.2 Lavori precedenti: successi e limiti	19
			21
3	Pro	gettazione 2	23
	3.1	Studio del contesto	23
			23
		3.1.2 Il robot KUKA	25
			26
	3.2		28
			28
			29
	3.3		30
			30
	3.4		36
		•	36
			37

	3.5	Ambie	ente					
		3.5.1	Oggetti					
		3.5.2	Proprietà fisiche dell'ambiente					
	3.6	Moda	lità di spostamento nell'ambiente virtuale 40					
	3.7	Intera	zioni					
		3.7.1	Interfacce fisiche e realismo delle interazioni 42					
		3.7.2	Scelta delle interfacce fisiche					
		3.7.3	Progettazione delle interazioni					
	3.8	Trasm	nissione delle informazioni					
		3.8.1	Natura delle informazioni 45					
		3.8.2	Trasmissione delle informazioni e apprendimento 45					
		3.8.3	Trasmissione diegetica vs non diegetica 45					
		3.8.4	Modalità di trasmissione delle informazioni scelte 46					
	3.9	Storyl	$\mathbf{board}$					
		3.9.1	Primo PoC					
		3.9.2	Secondo PoC					
		3.9.3	Terzo PoC					
		3.9.4	Quarto PoC					
		3.9.5	Quinto PoC e storyboard definitivo					
4	Rea	Realizzazione 5						
	4.1	Softwa	are utilizzati					
	4.2	Ambie	ente virtuale					
		4.2.1	Oggetti					
		4.2.2	Audio					
		4.2.3	Fisica dell'ambiente					
	4.3	Archit	tettura e moduli funzionali					
	4.4	Intera	zioni con gli oggetti del mondo virtuale 59					
		4.4.1	I controller HTC Vive e SteamVR 60					
		4.4.2	Interazioni con gli oggetti 61					
		4.4.3	Tele-trasporto					
		4.4.4	Interazioni con lo SmartPad 64					
		4.4.5	Logica dello SmartPad					
		4.4.5 4.4.6	Logica dello SmartPad					
	4.5	4.4.6 4.4.7	Menu iniziale					
	4.5 4.6	4.4.6 4.4.7 Comp	Menu iniziale					
		4.4.6 4.4.7 Comp	Menu iniziale65Pannello d'errore65portamento del robot65					

	4.7	Supporto per modalità multi-utente	6
5	Val	utazione sperimentale presso il KUKA College	7
	5.1	Metodologia	7
		5.1.1 Questionario preliminare	
		5.1.2 Addestramento	7
		5.1.3 Questionari Post-addestramento	7
		5.1.4 Questionari aggiuntivi per gli utenti del VRG	7.
		5.1.5 Quiz teorico Post-addestramento	7
		5.1.6 Esame sul robot e valutazione oggettiva e soggettiva	70
		5.1.7 Questionario post-esame	7
6	Ris	ultati	79
	6.1	Metodologia di analisi	79
	6.2	Analisi pre-addestramento	8
		6.2.1 Competenze in ambito robotico	8
	6.3	Analisi post-addestramento	8
		6.3.1 NASA-TLX	8
		6.3.2 Aspetti soggettivi	8
		6.3.3 Quiz conoscenze teoriche apprese	90
	6.4	Fase di valutazione	9
		6.4.1 Tempi di esecuzione	9
		6.4.2 Errori commessi	9;
		6.4.3 Valutazioni soggettive degli istruttori	94
	6.5	Analisi post-esame	9.
		6.5.1 Autovalutazione prestazioni	9.
		6.5.2 Soddisfazione	9
	6.6	Valutazione dell'esperienza in VR	9'
		6.6.1 Esperienze pregresse degli utenti	
		6.6.2 SUS	98
		6.6.3 Usability	
		6.6.4 Immersione/presenza	
		6.6.5 Information provisioning	
		6.6.6 Fedeltà della simulazione	
		6.6.7 Permanenza nell'ambiente virtuale	
7	Cor	nclusioni e sviluppi futuri	10
	7.1		10
			10

A	Que	stionari	utente	111
	A.1	Pre-train	$\operatorname{ning}$	 . 111
		A.1.1 I	Dati demografici	 . 111
		A.1.2 C	Competenze in ambito robotico	 . 111
		A.1.3 A	Aspettativa di Apprendimento (Self-Efficacy)	 . 112
	A.2	Post-trai	ining	 . 112
		A.2.1 A	Attenzione	 . 112
		A.2.2 B	Rilevanza	 . 113
		A.2.3 C	Confidenza	 . 114
		A.2.4 S	oddisfazione	 . 114
		A.2.5 A	Aspettativa di apprendimento	 . 115
	A.3	Quiz di t	teoria	 . 115
	A.4	Question	nario post-training per i soli utenti VRG	 . 117
		A.4.1 S	US	 . 117
		A.4.2 U	Jsability	 . 118
		A.4.3 In	mmersione/Presenza	 . 119
			nformation Provisioning	
	A.5	Post-esa:	me	 . 120
		A.5.1 A	Autoconsapevolezza di Apprendimento	 . 120
			Varie	
		A.5.3 S	Satisfaction	 . 121
	A.6	Question	nario post-esame per i soli utenti VRG	 . 121
			Satisfaction	
		A.6.2 V	Varie	 . 121
$\mathbf{B}$			alutazione per gli esaminatori	123
	B.1			
	B.2		i completamento	
	B.3		oni soggettive	
	B.4		rrori	
	B.5	Commer	nti Vari	 . 124

# Elenco delle figure

2.1	Desktop VR	14
2.2	Sistema CAVE	15
2.3	VR HMD	15
2.4	Mobile HMD	16
2.5	Esempio di categorizzazione in base ad immersività ed inte-	
	rattività	17
3.1	Lezione teorica frontale	24
3.2	Spiegazione delle procedure pratiche	24
3.3	Sessione pratica in gruppi	25
3.4	Il robot	26
3.5	Il KUKA SmartPad	27
3.6	Asse 1 in posizione di pre-calibrazione, con le due tacche allineate	31
3.7	L'utente muove l'asse 1	31
3.8	L'utente tiene premuto il pulsante di consenso	32
3.9	Valigetta contenente gli strumenti per la calibrazione	32
3.10	L'utente avvita l'EMD su cartuccia di calibrazione dell'asse 1 .	33
3.11	Inserimento del connettore alla presa di corrente alla base del	
	robot	33
3.12	Collegamento del trasformatore	34
3.13	Collegamento dell'EMD	34
3.14	Touchscreen dello SmartPad	35
3.15	L'utente tiene premuti il tasto Start ed il pulsante di consenso	35
3.16	Come viene presentata la cella didattica sul manuale	38
3.17	Confronto tra le differenti aree di tracking supportate dai di-	
	versi modelli di visori	43
4.1	Architettura logica dell'applicazione	60
4.2	I pulsanti dei controller Vive	61
4.3	FSM che gestisce ile led dello SmartPad che indica se l'EMD	
	si trova in area di calibrazione	67
4.4	FSM che gestisce la fase di calibrazione nel self-training	68

6.1	Competenze in ambito robotico per il gruppo STG (a) e VRG (b)
6.2	Punteggi NASA-TLX
6.3	Punteggi NASA-TLX di riferimento per le categorie "Robot
	Operation" e "Video Game"
6.4	Attenzione, parte 1
6.5	Attenzione, parte 2
6.6	Rilevanza
6.7	Confidenza
6.8	Soddisfazione
6.9	Self-efficacy, pre-addestramento (a) e post-addestramento (b) . 89
6.10	Numero risposte corrette per ogni domanda
6.11	Punteggio medio totalizzato
6.12	Tempi di esecuzione espressi in secondi
6.13	Errori commessi, gravi (a) e non gravi (b)
6.14	Valutazioni soggettive degli istruttori
	Autoconsapevolezza di apprendimento 96
6.16	Autovalutazione
6.17	Esperienze pregresse
6.18	SUS
6.19	Percentili per l'interpretazione del punteggio complessivo del
	SUS
6.20	Usability
6.21	Immersione/presenza
6.22	Information provisioning

# Capitolo 1

## Introduzione

#### 1.1 Motivazioni

La possibilità di svolgere questo lavoro di tesi è nata nel contesto di una collaborazione già avviata e produttiva tra VR@Polito e KUKA Roboter Italia Spa, succursale italiana di KUKA, produttore leader a livello mondiale di robot industriali e soluzioni per l'automazione industriale.

KUKA, che si contraddistingue per la ricerca continua di soluzioni all'avanguardia, ha già iniziato ad esplorare l'uso della VR, ad esempio fornendo la possibilità di fruire in VR le simulazioni di intere catene di montaggio create con il suo software KUKA.SimPro.

La collaborazione è nata con lo scopo di creare una sinergia tra le competenze delle due realtà per ideare e sperimentare insieme soluzioni di Realtà Virtuale, Realtà Aumentata e Realtà Mista in ambito di automazione industriale su un ampio spettro di fronti, tra cui l'innovazione dell'addestramento degli addetti all'utilizzo di macchinari industriali, che ha costituito il focus di questo lavoro di tesi.

### 1.2 Obiettivi della tesi

Il lavoro di questa tesi è nato lo scopo di affrontare la sperimentazione della VR come strumento didattico nello specifico contesto dei corsi di Programmazione robot destinati agli operatori che utilizzano i manipolatori robotici

#### KUKA.

L'obiettivo era di ideare, implementare e validare uno strumento in grado di sfruttare tecnologie e prassi allo stato dell'arte per fornire un addestramento all'esecuzione di determinate procedure, fruibile in modalità di auto-apprendimento, cioè senza il supporto da parte di personale esperto.

### 1.3 Organizzazione dei contenuti

Nel secondo capitolo viene trattato lo stato dell'arte della VRI usata per l'addestramento e sono fornite le definizioni dei termini tecnici che vengono utilizzati nei capitoli successivi.

Il terzo capitolo illustra il contesto applicativo, le diverse fasi in cui sono state svolte l'ideazione e la progettazione dello strumento ed infine tutti gli elementi costitutivi del progetto dello strumento.

Il quarto capitolo si occupa di illustrare nel dettaglio l'implementazione delle funzionalità dello strumento.

Nel quinto capitolo sono illustrate le modalità con cui sono state effettuate le valutazioni sperimentali, i cui risultati sno illustrati e commentati nel sesto capitolo.

Nel settimo capitolo vengono tratte delle conclusioni dalle evidenze sperimentali e sono delineati alcuni dei possibili sviluppi futuri.

# Capitolo 2

# Stato dell'arte

#### 2.1 Realta Virtuale

Dagli anni 60 sotto il termine VR sono state inserite una serie di applicazioni che si servono di tecnologie software e hardware, anche molto differenti tra loro, per realizzare esperienze in cui l'utente interagisce con un ambiente virtuale, totalmente frutto di fantasia o ricostruzione di un ambiente esistente nella realtà fisica. Molte di queste esperienze cercano anche di generare nell'utente l'illusione (multi-)sensoriale di essere fisicamente presente in tale ambiente virtuale.

I concetti fondamentali su cui si articola la teoria della VR sono *interattività*, *immersione* e *presenza*[1].

- Interattività: quantifica il grado di libertà con cui l'utente può contribuire a modificare forma e contenuto dell'ambiente VR in tempo reale[2].
- Immersione (o immersività): una misura dell'isolamento che l'utente percepisce dal mondo reale, fisico in cui si trova.
- Presenza: l'esperienza soggettiva di trovarsi in un certo luogo o ambiente, pur essendo fisicamente situati in un altro[3].

Gli autori del lavoro riportato in [4] osservano come immersione e presenza siano a volte utilizzati in modo interscambiabile, ma ne individuano una relazione causale: l'immersione è sperimentata quando si utilizzano tecnologie che cercano di includere totalmente l'utente in una simulazione di un altro ambiente fornendogli stimoli sensoriali di diversa natura e limitando la sua capacità di percepire gli stimoli sensoriali provenienti dal mondo reale fisico.

Se, in tale situazione, il cervello ed il sistema nervoso dell'utente reagiscono agli stimoli del mondo virtuale in un modo simile a quello in cui farebbero nella medesima situazione nel mondo reale allora l'utente sta sperimentando presenza[4].

#### 2.1.1 Tecnologie per la Realtà Virtuale

Si è scelto di seguire la stessa categorizzazione utilizzata in [1] delle tecnologie consumer<sup>1</sup> per la VR. Sono tecnologie per la VR quelle riportate di seguito.

• Desktop VR: l'ambiente virtuale è fruito tramite uno schermo. L'interazione è realizzata con mouse e tastiera o joysticks. Un esempio è mostrato in Figura 2.1.



Figura 2.1: Desktop VR

• Sistemi CAVE (Cave Automatic Virtual Environment): stanze sulle cui pareti è ricreato l'ambiente virtuale attraverso dei proiettori, come in Figura 2.2. Vi sono anche versioni in cui l'utente è circondato da schermi.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Queste tecnologie sono in costante evoluzione, le tecnologie consumer sono solo un sottoinsieme di tutte quelle esistenti.



Figura 2.2: Sistema CAVE

• Virtual Reality Head Mounted Displays (VR HMD): visori indossabili che comprendono in generale un display stereoscopico, cuffie stereo, sensori di movimento (tra cui giroscopi, accelerometri, magnetometri ecc.), e due controller per garantire l'interazione attraverso le mani, con o senza attuatori per feedback aptici. L'ambiente virtuale è creato da un software sul PC a cui sono collegati. Tra questi, vi sono, ad esempio, Oculus Rift e HTC Vive (Figura 2.3).



Figura 2.3: VR HMD

• Mobile HMD: visori che non richiedono di essere collegati ad un PC, bensì prevedono che venga inserito al loro interno uno smartphone(o ne integrano direttamente le caratteristiche). A volte integrano un controller, che garantisce un'interazione molto limitata con l'ambiente virtuale, come nel caso del Samsung Gear, mostrato in Figura 2.4.



Figura 2.4: Mobile HMD

• Enhanced VR: una combinazione di visori VR e strumenti di tracking avanzato che permettono interazioni più naturali con l'ambiente virtuale. Tra questi strumenti vi sono guanti per il tracking delle mani, tute per il tracking di tutto il corpo, sistemi per il tracciamento dello sguardo, ecc. Rientrano in questa categoria anche la combinazione di HMDs con strumenti di simulazione, ad esempio, simulatori di guida, di volo, ecc.

Tali tecnologie sono molto diverse tra loro e la scelta di quale utilizzare per la fruizione di una applicazione VR è cruciale perché determina il grado di interattività ed immersione che l'utente può sperimentare, come mostrato nell'immagine 2.5.

#### 2.1.2 Realtà Virtuale Immersiva

In base ai diversi gradi di immersione e presenza che le tecnologie per la VR sono in grado far sperimentare all'utente, possono essere ben distinti due tipi di esperienze VR: immersive e non immersive.

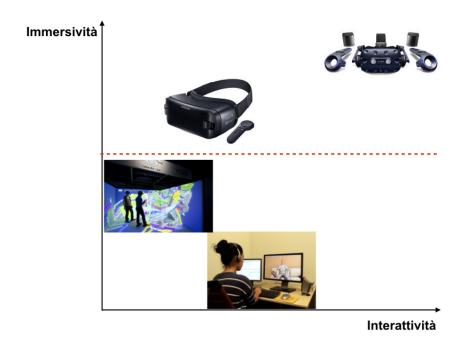


Figura 2.5: Esempio di categorizzazione in base ad immersività ed interattività

Su questa categorizzazione non tutti concordano in letteratura. Una dicussione molto approfondita è stata riportata in [1]: alcuni suggeriscono che l'immersione dovrebbe essere vista come un attributo tecnologico che può essere verificato in modo oggettivo, mentre altri descrivono l'immersione come una soggettiva convinzione individuale, cioè un fenomeno psicologico.

Dal punto di vista tecnologico, l'immersione indica quanto i display siano in grado di fornire un'inclusiva, estensiva e vivida illusione della realtà che circonda l'utente. Questo include quanto riescano ad escludere la realtà fisica, il range delle modalità sensoriali coinvolte, l'estensione dell'ambiente virtuale, la risoluzione e accuratezza del display. Gli attributi tecnologici di una tecnologia VR – come frame rate o risoluzione del display – conseguentemente determinano il grado di immersione che un utente può esperire.

Il punto di vista psicologico, invece, considera l'immersione uno stato psicologico in cui l'utente percepisce un isolamento dei propri sensi dal mondo

reale. In accordo con questa visione, il grado di immersione percepito differisce da persona a persona e gli attributi tecnologici lo influenzano in maniera minore[1].

I due approcci, dunque, concordano nel caratterizzare l'immersione come una misura dell'isolamento che l'utente percepisce dal mondo reale in cui si trova e differiscono sull'individuarne le cause: tecnologiche ed ergonomiche l'uno, psicologiche l'altro.

Il lavoro menzionato pone anche l'attenzione sull'aspetto socioculturale dell'immersione: l'idea su cosa sia immersivo e cosa non lo sia è cambiata nel tempo. Quando i primi giochi in 3D sono stati introdotti nei primi anni 90 i giocatori li avrebbero considerati immersivi nonostante utilizzassero delle grafiche renderizzate con sprite da  $20 \times 160$  pixels su uno schermo CRT[1].

A prescindere dal dibattito in corso in letteratura, sono attualmente inserite nella categoria VR immersiva le applicazioni VR fruite con visori (di alta fascia o mobile), poiché VR immersiva è intesa, in generale, come l'insieme di sistemi hardware e software che cercano di includere totalmente l'utente in un'illusione sensoriale di essere presente in un altro ambiente[5].

Stando a questa definizione, l'applicazione realizzata in questo lavoro di tesi è di VR immersiva.

## 2.2 Realtà Virtuale immersiva ed addestramento

#### 2.2.1 Motivazioni

La sperimentazione dell'utilizzo della VR immersiva a scopo didattico è iniziata già decenni fa. Da subito in molti hanno intravisto le potenzialità che aveva nel permettere l'implementazione di approcci educativi nuovi ee nel potenziare quelli esistenti.

Tutta la letteratura prodotta fino ad ora conviene che il motivo dell'interesse crescente siano proprio le caratteristiche intrinseche della VR immersiva: la capacità di generare negli utenti immersione e presenza e di garantire l'interazione con un mondo virtuale.

In ambito educativo, queste caratteristiche rendono la VR immersiva interessante per alcuni approcci educativi, in particolare quelli, derivati dalle teorie

connettiviste e costruttiviste, che considerano l'esperienza pratica diretta un elemento imprescindibile per il processo di apprendimento[1].

La IVR permette all'utente di esplorare e sperimentare con un ambiente che nella realtà potrebbe essere pericoloso e, soprattutto, di commettere errori e poter imparare da essi senza causare conseguenze nel mondo reale, per tali motivi, l'interesse maggiore per l'utilizzo della IVR come strumento didattico viene dall'ambito della formazione di personale adulto.

Non a caso, i primi esperimenti di introduzione di queste tecnologie nella formazione sono avvenuti in contesti molto specifici e per specifiche figure: chirurghi, piloti, militari.

Questi ambiti, infatti, hanno in comune, da un lato, l'esigenza di formare il personale sulla gestione di situazioni tendenzialmente pericolose e difficili da ricreare, dall'altro gli strumenti economici per poter investire in tecnologie che fino a pochi anni fa erano alla portata di pochi, dal momento che solo dal 2013, con l'uscita sul mercato di Oculus Rift, che ha aperto la nuova generazione di HMD consumer, le tecnologie per la IVR sono diventate alla portata del grande pubblico.

Da quel momento, altri comparti, industriali e non, hanno manifestato interesse verso i Virtual Reality Training Systems (VRTS) e la VR è stata descritta come "the learning aid of the 21st century" [6]

#### .

### 2.2.2 Lavori precedenti: successi e limiti

La VR immersiva è stata utilizzata soprattutto per l'addestramento di personale adulto in specifici ambiti o nel contesto di corsi universitari, soprattutto di ingegneria e medicina.[7] Si rimanda ai lavori in [1][7][4][8] per una panoramica completa, in questo documento si tratteranno le esperienze più affini a quella del lavoro di tesi.

Gli autori dello studio in [1] notano come questo campo sia lontano dall'essere in una fase di maturità, dunque i vari lavori differiscono estremamente per obiettivi, metodologie progettuali, realizzative, di validazione. A ciò ha contribuito il fatto che la maggior parte dei lavori precedenti non ha sfruttato né nelle fasi di progettazione, né nella definizione e valutazione dei risultati di apprendimento le indicazioni fornite dalle varie teorie cognitive[1].

Uno degli ambiti in cui i VRTS hanno raggiunto la maggior maturità è quello chirurgico: i simulatori di operazioni chirurgiche sono già integrati

nei curricula degli studenti di medicina di molti Paesi e si sta andando verso la standardizzazione delle metrice di valutazione di tali strumenti per la formazione, mentre la modalità VR inizia ad essere supportata da alcuni simulatori. In questo contesto si inserisce lo studio in [9], che ha cercato di verificare se la modalità VR di un noto simulatore per la formazione all'utilizzo di robot per operazioni chirurgiche fosse sufficiente per realizzare un auto-apprendimento completo degli utenti, senza il bisogno di ulteriore supporto da parte di esperti. Dallo studio è emerso che gli utenti che hanno utilizzato il VRTS hanno ottenuto risultato migliori degli utenti del gruppo di controllo e sofferto meno carico cognitivo. Tuttavia il VRTS ha dimostrato di non offrire una esperienza di auto-apprendimento sufficientemente completa e che del supporto ulteriore era ancora necessario.

Passando all'ambito industriale, dallo studio riportato in [10] sull'utilizzo di un VRTS per l'apprendimento di operazioni di manutenzione è emerso che l'uso del VRTS possa portare all'acquisizione di un più alto livello di capacità rispetto ad un addestramento tradizionale, nonstante il tempo speso nel secondo fosse maggiore. Gli autori affermano anche che, mentre i metodi tradizionali permettono agli utenti di aumentare gradualmente le proprie abilità cognitive e psicomotorie, il VRTS testato permette uno sviluppo più veloce.

Rispetto agli utenti sottoposti all'addestramento tradizionale, quelli che hanno eseguito il VRTS hanno sperimentato un livello di coinvolgimento maggiore, che è risultato essere correlato allo punteggio maggiore sulle conoscenze acquisite ed all'abilità maggiore nel lavorare nell'ambiente per cui l'addestramento è stato svolto, oltre alla maggior velocià con cui hanno eseguito le operazioni.

I risultati dello studio in [11] sull'utilizzo di un VRTS per la formazione sulle procedure di sicurezza in un impianto di produzione energetica suggeriscono che rimpiazzare o supportare con un VRTS l'addestramento tradizionale, basato sulla didattica frontale in aula, porta ad un trasferimento di consoscenze migliore. Il VRTS proposto si è dimostrato più efficace in termini di apprendimento pratico ed ugualmente efficace in termini di apprendimento teorico rispetto all'addestramento tradizionale. C'è da sottolineare che la valutazione delle due soluzioni di addestramento è stata effettuata con il simulatore VR, proprio perché sarebbe stato impossibile replicare le situazioni di emergenza senza incorrere in rischi troppo grandi, e che entrambe le soluzioni hanno previsto una fase iniziale di spiegazioni frontali.

In riferimento allo specifico ambito di applicazione in cui si è inserito il

lavoro di tesi, una parte degli sforzi di miglioramento dell'interfaccia uomorobot sta andando proprio verso la virtualizzazione. Ad esempio, in [12] è descritta un'applicazione VR per la simulazione e la programmazione off-line del manipolatore robotico Mitsubishi Movemaster RV-M1, che ha ottenuto risultati interessanti minimizzando il tempo utilizzato per programmare il robot, perché la programmazione effettuata sul robot virtuale può essere validata compilando ed eseguendo il codice sul robot reale.

Questo tentativo di virtualizzazione dell'interfaccia uomo-robot è stato motivato proprio dalla volontà di offrire la possibilità di apprendere l'utilizzo di queste macchine a chi non ha la possibilità di interfacciarsi con il robot reale e si inserisce in un più ampio sforzo da parte da parte delle aziende produttrici di rendere possibile la programmazione a distanza di robot reali. Questo studio non ha, tuttavia. esposto risultati di test effettuati con utenti.

#### 2.2.3 Sfide

Oltre al superamento dei limiti delle soluzioni precedenti, altre sfide sono da considerare.

Come notano gli autori dello studio riportato in [8], l'obiettivo principale di un VRTS, quello di facilitare il trasferimento di conoscenze e capacità dall'ambiente virtuale al mondo reale, si accompagna sempre al rischio di trasferire anche conoscenze o capacità inappropriate o scorrette. Le astrazioni e semplificazioni operate dai VRTS rischiano di essere fuorvianti e controproducenti per l'apprendimento se la progettazione e la validazione dello strumento non vengono eseguite in modo corretto.

Gli autori dello studio in [4] riportano che l'attitudine generalmente positiva degli utenti verso le tecnologie di VR immersiva non sia sufficiente da sola a garantire il superamento di barriere ancora presenti all'uso di tali strumenti, come la cybersickness<sup>26</sup> e i limiti ancora presenti nelle tecnologie che impattano sull'ergonomia.

Gli autori del lavoro in [4] pongono l'attenzione sul fatto che il contesto in cui l'utente svolge il proprio apprendimento influisce sull'efficacia dello stesso e che quindi gli esperimenti di utilizzo della VR in ambito di formazione del personale dovrebbero essere svolti in un ambiente autentico, non un laboratorio.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup>Una sensazione di malessere e nausea simile a quella provocata in alcune persone dal mal d'auto

# Capitolo 3

# Progettazione

La progettazione del lavoro è stato un processo iterativo: dopo una fase preliminare di studio del contesto e definizione dei macro-obiettivi, durata due mesi e a sua volta iterativa, si è proceduto a progettare, realizzare e validare diversi PoC<sup>1</sup> di complessità incrementale, giungendo allo strumento finale.

### 3.1 Studio del contesto

#### 3.1.1 Il corso

Si è avuta la possibilità di frequentare il corso di Programmazione robot base di Dicembre 2018 presso il KUKA College di Grugliasco.

L'obiettivo era duplice: acquisire una conoscenza del contesto adeguata, ma anche studiare la struttura e l'approccio del corso.

Durante la settimana di svolgimento delle lezioni è iniziato il confronto con gli istruttori durato fino al termine del progetto di tesi. Si è iniziato a collezionare le loro prospettve sul corso, le criticità riscontrate, la loro attitudine verso la VR.

Il corso è strutturato in un'alternanza di lezioni teoriche frontali ed esercitazioni pratiche sui robot presenti nel KUKA College; il numero massimo di partecipanti per ogni edizione è di 9 persone, per garantire che si possa lavorare sui robot in gruppi di massimo 3 individui.

Tutti i contenuti teorici sono presenti in un manuale distribuito all'inizio del

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Proof of Concept: prototipo.

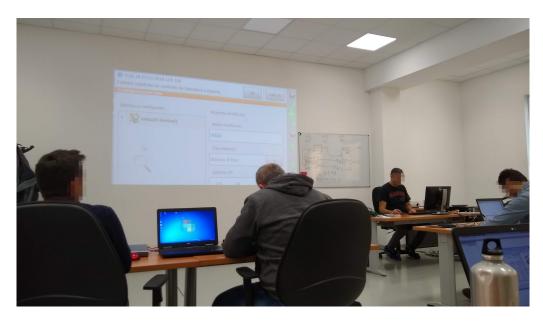


Figura 3.1: Lezione teorica frontale



Figura 3.2: Spiegazione delle procedure pratiche

corso a tutti i partecipanti, che contiene anche domande di riepilogo ed esercizi simili a quelli presenti in un test scritto svolto al termine delle attività. l'istruttore ha a disposizione un PC collegato ad un proiettore su cui utilizza:

• la versione digitale del manuale



Figura 3.3: Sessione pratica in gruppi

- il KUKA.WorkVisual: un software per la programmazione off-line dei robot KRC4, visibile in Figura 3.1
- alcuni video di operazioni effettuate con i robot in contesti produttivi.

Come detto, i momenti teorici sono alternati a sessioni pratiche sul robot, in cui l'istruttore mostra le operazioni da eseguire ai partecipanti che successivamente si esercitano sul robot in gruppi di 3, tenendo quindi occupati 3 robot contemporaneamente.

#### 3.1.2 Il robot KUKA

Il robot presente nel KUKA College è costituito da due parti ben distinte:

- il manipolatore KR 16, chiamato anche manipolatorio e mostrato in 3.4a, è costituito da 6 elementi mobili concatenati che ruotano ognuno intorno ad un asse;
- il KRC4, contenuto nell'armadio di comando mostrato in secondo piano in Figura 3.4b, il sistema di controllo che invia i comandi al manipolatore.

L'utente può programmare il robot, dove con programmare si intende programmarne i movimenti, attraverso il KUKA SmartPad, presente in primo piano in Figura 3.4b e mostrato anche in Figura 3.5, collegato attraverso un cavo al sistema di controllo.





Figura 3.4: Il robot

### 3.1.3 Le riunioni e gli scenari

#### Le riunioni

Dopo una fase di analisi e studio sono state organizzate delle riunioni per discutere i possibili scenari di integrazione della VR nel corso.

Per garantire che gli interlocutori lato KUKA avessero gli elementi per poter valutare le diverse opzioni, si è ritenuto opportuno far loro sperimentare in prima persona delle esperienze di VR immersiva; quindi, è stata data loro la possibilità di provare delle applicazioni, tra cui alcune precedentemente



Figura 3.5: Il KUKA SmartPad

realizzate in ambito di addestramento.

Inoltre, per dare un'idea di come la VR immersiva potesse essere applicata nel contesto del corso è stato realizzato un semplice PoC, in cui era possibile far muovere un robot.

#### Gli scenari

Le tipologie di applicazioni individuate e proposte erano classificabili in base ai parametri riportati di seguito.

- Impatto sull'apprendimento: ottimizzazione ed efficacia lezioni teoriche; consolidamento conoscenze teoriche; consolidamento conoscenze pratiche; ampliamento conoscenze pratiche.
- Interattività: interattive; non interattive.
- Momento di fruizione: pre-corso; intra-corso; post-corso.

I diversi scenari erano invece quelli elencati di seguito.

- Simulazione interattiva per l'addestramento sulle pratiche di sicurezza e prevenzione, da eseguire prima dell'inizio del corso, che sarebbe andata a sostituire la lezione solo teorica sull'argomento. Impatto: ottimizzazione ed efficacia lezioni teoriche
- Ricostruzione catena di montaggio da esplorare: non interattiva. Impatto: ottimizzazione efficacia delle lezioni teoriche.
- Simulazione interattiva di procedure affrontate in modo solo teorico durante il corso, da effettuare post-corso o intra-corso in sostituzione della lezione teorica. Impatto: ampliamento delle conoscenze pratiche, consolidamento delle conoscenze teoriche.
- Simulazione interattiva di procedure affrontate in modo teorico e pratico durante il corso, da effettuare post-corso. Impatto: consolidamento delle conoscenze teoriche, consolidamento delle conoscenze pratiche.
- Simulazione interattiva di procedure "ludiche" (i robot KUKA sono ampiamente utilizzati non solo in ambito industriale, ad esempio per realizzare sculture, ma anche per preparare cocktail), da effettuare post-corso. Impatto: consolidamento delle conoscenze teoriche, consolidamento delle conoscenze pratiche.

Con gli interlocutori dell'azienda si è scelto di realizzare la simulazione di una procedura affrontata durante il corso in forma pratica che teorica, nell'ottica di realizzare un esperimento di integrazione della VR nel corso e di poterlo validare, sperimentandone la capacità di far apprendere conoscenze e competenze.

### 3.2 Interviste ed individuazione del PoC

#### 3.2.1 Individuazione delle modalità di utilizzo

Questa è stata una fase molto delicata: bisognava individuare un'applicazione che rispondesse alle esigenze e preferenze d'uso degli istruttori e che fosse in linea con lo stato dell'arte.

Da un lato, gli istruttori immaginavano l'applicazione VR come un supporto alla didattica in aula, un media in più a disposizione dell'istruttore, un

ampliamento delle sue possibilità espressive.

Un esempio di scenario immaginato dagli istruttori poteva prevedere, ad esempio, una configurazione in cui i partecipanti al corso indossano visori non interattivi che li immergono in un ambiente 3D la cui simulazione è gestita in tempo reale dall'istruttore attraverso un software sul PC, su cui gli altri utenti non possono intervenire, essendo solo fruitori passivi.

Questo tipo di scenario non metteva, di fatto, in discussione l'approccio e la struttura del corso, in cui vi è una ben definita alternanza tra momenti di apprendimento passivo (le lezioni frontali) e di apprendimento attivo (esercitazioni sul robot), imperniato sulla Figura dell'istruttore e considerate particolarmente efficaci.

Dall'altro lato, si voleva spingere la visione un passo in avanti, immaginando un un addestramento "di domani".

Si è deciso di realizzare un'applicazione multi-utente utilizzabile in due modalità.

- 1. Modalità self-training: l'applicazione fornisce un supporto esaustivo sulla procedura di calibrazione, utilizzabile dallo studente in auto-apprendimento, cioè senza la necessità della presenza di un istruttore, fruibile con visore e controller di alta fascia (HTC Vive o altri). Le conoscenze apprese sono sia di tipo pratico che teorico. Lo studente la utilizza in modalità utente singolo.
- 2. Modalità classroom: l'istruttore utilizza l'applicazione in modalità multiutente per mostrare l'esecuzione delle diverse operazioni sul robot in aula. l'istruttore interagisce con il mondo virtuale attraverso visore e controller HTC Vive (o simili), mentre gli studenti sono dotati di visori non interattivi (es, Google Cardboard o Samsung Gear) con cui possono osservare l'istruttore, o meglio un suo avatar, eseguire le operazioni nell'ambiente virtuale.

A questo punto andava scelto il caso d'uso, cioè uno specifico argomento, svolto nel corso, su cui realizzare l'addestramento virtuale, per poterne sperimentare l'efficacia.

### 3.2.2 Individuazione degli obiettivi di apprendimento

Date le premesse iniziali, cioè il voler mettere alla prova l'efficacia della VR immersiva, se ne volevano sperimentare le capacità di:

- trasferire conoscenze teoriche;
- trasferire conoscenze procedurali pratiche;
- incentivare capacità analitiche;
- indurre determinati comportamenti;
- influenzare l'interesse per la materia.

Si è quindi individuata una procedura affrontata nel corso che prevedesse l'esecuzione sequenziale di molte operazioni, di scelte operative e valutazioni da parte dell'utente per la cui corretta esecuzione fossero necessarie delle conoscenze teoriche.

### 3.3 La procedura di calibrazione senza carico

Si è scelta la calibrazione del robot senza carico, d'ora in poi chiamata solo calibrazione, per brevità.

La struttura di un corso tradizionale presso il KUKA College prevede che questa procedura venga trattata durante la seconda giornata, quando gli studenti hanno già acquisito una serie di nozioni e capacità, tra cui quella di muovere manualmente il robot.

Nel prossimo paragrafo si illusterà in modo sintetico e non esaustivo la procedura.

#### 3.3.1 La calibrazione

Si tratta della procedura con cui si assegna ad ogni asse del robot il riferimento al proprio zero meccanico. Un robot non correttamente calibrato non si comporta in modo deterministico, per cui una corretta esecuzione della calibrazione è essenziale.

Di seguito sono riportati e spiegati brevemente i passi della procedura così come sono indicati nel manuale.

1. Portare il robot in posizione di pre-calibrazione: portare ogni asse vicino al proprio zero meccanico.

Questa posizione, come mostra la Figura 3.6 è indicata, per ogni asse, da due tacche di mira. Una tacca si trova alla base dell'asse, l'altra si



Figura 3.6: Asse 1 in posizione di pre-calibrazione, con le due tacche allineate



Figura 3.7: L'utente muove l'asse 1

trova sull'asse precedente.



Figura 3.8: L'utente tiene premuto il pulsante di consenso



Figura 3.9: Valigetta contenente gli strumenti per la calibrazione

Per portare, dunque, in posizione di pre-calibrazione un certo asse bisogna farlo ruotare lentamente finché le due tacche non sono allineate. Per far eseguire dal robot questo tipo di movimenti, l'utente utilizza lo SmartPad come mostrato in Figura 3.7, cioè utilizza i tasti per la ione manuale: sei coppie di tasti, ognuna per ogni asse, che fanno eseguire ad ogni asse una rotazione in senso positivo (tasto +) o negativo (tasto -). Non basta tenere premuti i tasti di movimentazione manuale per far eseguire al robot dei movimenti: il robot esegue dei movimenti solo se



Figura 3.10: L'utente avvita l'EMD su cartuccia di calibrazione dell'asse 1



Figura 3.11: Inserimento del connettore alla presa di corrente alla base del robot

l'utente tiene premuto il pulsante di consenso, mostrato in 3.8. Tornando alla Figura 3.7, la mano sinistra non sta solo sorreggendo lo SmartPad, ma sta anche tenendo premuto il pulsante di consenso.

2. Avvitare l'EMD sulla cartuccia di misurazione e collegarla: in questa



Figura 3.12: Collegamento del trasformatore



Figura 3.13: Collegamento dell'EMD

fase l'utente utilizza gli oggetti contenuti nella valigetta in Figura 3.9: avvita l'EMD (oggetto numero 4 in figura) sulla cartuccia di misurazione dell'asse che ha intenzione di calibrare, come in Figura 3.10; realizza il collegamento elettrico: utilizza uno dei due cavi (oggetto numero 5) per collegare il trasformatore (oggetto numero 1) alla presa di corrente che



Figura 3.14: Touchscreen dello SmartPad



Figura 3.15: L'utente tiene premuti il tasto Start ed il pulsante di consenso

si trova alla base del robot, come si vede in Figura 3.11 e Figura 3.12, quindi collega al secondo connettore del trasformatore un connettore del secondo cavo.

3. Collegare il cavo di collegamento MEMD/SEMD: l'utente alimenta l'E-MD collegandovi l'altro connettore del cavo, come mostrato in Figura

#### 3.13.

- 4. Eseguire la corsa di calibrazione: in questa fase l'utente interagisce con il touchscreen dello SmartPad (Figura 3.14) avviando la procedura di calibrazione per l'asse su cui ha avvitato l'EMD.
- 5. Premere il pulsante di consenso e il tasto Start e tenerli premuti come in Figura 3.15 per tutta la durata del processo di misurazione: in questa fase avviene la calibrazione dell'asse.
- 6. Togliere il cavo di misurazione dall'EMD; togliere quindi l'EMD dalla cartuccia di misurazione
- 7. Ripetere i passi 2 6 per tutti gli assi da calibrare (lasciando intatto il collegamento alla corrente, si deve solo intervenire sul connettore dell'EMD).

### 3.4 Progettazione dell'applicazione

#### 3.4.1 Studio della procedura

Il primo passo della progettazione è consistito in uno studio approfondito della procedura.

La procedura è stata studiata ed analizzata a partire dal manuale e successivamente in una sessione di brainstorming con gli istruttori, in cui è stata data una dimostrazione pratica della procedura e si è discusso degli errori frequenti commessi nella sua esecuzione.

In un'ulteriore analisi sono state individuate tutte le operazioni da eseguire. Da questa sono stati estratti:

- tutti gli oggetti con cui si interagisce e le modalità di interazione;
- la logica dei movimenti del robot;
- le conoscenze e le capacità che devono essere acquisite;
- le conoscenze e le capacità che si presume siano state acquisite nelle lezioni precedenti e che sono indispensabili per svolgere la calibrazione (ad esempio, movimentazione manuale degli assi);
- gli errori gravi e non gravi in cui gli utenti possono incorrere e le relative conseguenze.

#### 3.4.2 Elementi costitutivi

Un VRTS può essere scomposto in una serie di elementi costitutivi fondamentali. Di seguito ne è esposto un elenco, le cui singole voci saranno approfondite in seguito, che trae ispirazione da quello indicato dal lavoro in [1], specializzandolo.

- 1. L'ambiente virtuale come ricostruzione realistica, sia per quanto riguarda l'aspetto degli oggetti che i loro comportamenti dal punto di vista fisico, dell'ambiente reale in cui le procedure apprese devono essere svolte.
- 2. Le modalità con cui l'utente può spostarsi nell'ambiente virtuale ed esplorarlo.
- 3. Le interazioni che l'utente può avere con l'ambiente ed il comportamento dell'ambiente conseguente a tali interazioni.
- 4. Le istruzioni su come usare il VRTS e come eseguire le operazioni da apprendere e i feedback immediati dati dal sistema all'utente per informar-lo sull'esito delle operazioni eseguite e sulla correttezza delle interazioni effettuate con gli oggetti.

Le due modalità di utilizzo previste per l'applicazione differiscono negli elementi costitutivi.

- 1. L'ambiente è identico nelle due modalità.
- 2. Le modalità di spostamento sono identiche nelle due modalità per quanto riguarda l'utente attivo. Gli utenti passivi della modalità Classroom non sono liberi di spostarsi.
- 3. Le modalità di interazione con l'ambiente sono le medesime per l'utente attivo. Gli utenti passivi della modalità Classroom non possono in alcun modo interagire con l'ambiente.
- 4. Nella modalità Classroom è l'istruttore l'utente attivo, dunque non vi sono istruzioni fornite dal sistema ed è l'istruttore a commentare e fornire informazioni mentre esegue le operazioni in VR.

#### 3.5 Ambiente

Si è scelto di realizzare l'ambiente virtuale come una copia fedele della cella didattica del KUKA College, mostrata in Figura 3.16.

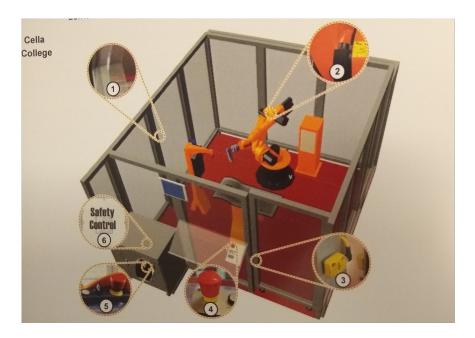


Figura 3.16: Come viene presentata la cella didattica sul manuale

La cella didattica è uno spazio di circa  $4\times3$  metri, delimitato da pareti trasparenti, chiuso da una porta scorrevole, il cui stato di aperta/chiusa è rilevato da un sensore (perché in determinate modalità operative il robot non può essere mosso se la porta della cella è aperta).

All'interno della cella è presente il manipolatore, mentre l'armadio di comando si trova fuori, accanto alla porta.

#### 3.5.1 Oggetti

Come detto, in fase di progettazione dell'ambiente si è proceduto a scegliere quali oggetti tra quelli presenti nella cella didattica del KUKA College inserire nella simulazione e perché.

Tutti gli oggetti appartenenti all'ambiente possono essere categorizzati, in accordo con [8], facendo riferiemento alle sguenti tipologie.

- Fondamentali: gli elementi strutturali della scena.
- Interattivi: le parti della scena con cui l'utente interagisce, direttamente o indirettamente, e che sono fondamentali per lo svolgimento delle operazioni da apprendere.

• Contestuali: forniscono all'utente degli elementi per contestualizzare la scena in cui si trova.

#### **Fondamentali**

- Pareti della gabbia.
- Armadio di comando.
- Valigetta contenente gli strumenti per la calibrazione.

#### Contestuali

- Muri e pavimento analoghi a quelli del KUKA College.
- Gli oggetti e le strutture presenti nella cella didattica per le esercitazioni sulle procedure più avanzate.

#### Interattivi

- Manipolatore.
- EMD.
- Oggetti per l'alimentazione (cavi, trasformatore).
- Porta della cella.
- KUKA SmartPad.

#### 3.5.2 Proprietà fisiche dell'ambiente

Si è deciso di di assegnare ai diversi oggetti dell'ambiente virtuale dei comportamenti realeistici dal punto di vista fisico.

Il movimento dei robot industriali è molto sofisticato; per questo si è inizialmente ipotizzato di far comunicare l'appliazione VR con il software di simulazione KUKA SimPro ed animare il modello virtuale del robot in tempo reale con i dati forniti da quel software.

Questa strada è stata abbandonata perché con il KUKA SimPro non è possible simulare la calibrazione e dunque i movimenti del robot sono stati programmati da zero. Ciò è stato possibile perché nella procedura di calibrazione il robot viene effettivamente mosso solo asse per asse e di pochi gradi.

#### Audio

Oltre a quelli visivi, gli elementi uditivi giocano un ruolo chiave nel determinare il realismo, supportare l'immersione e creare un senso di presenza nell'ambiente virtuale; dunque il realismo degli elementi uditivi dovrebbe essere dello stesso livello di quello degli elementi visivi [8].

In fase di progettazione, si è scelto di utilizzare elementi uditivi realistici, ad esempio per riprodurre il rumore del motore del robot.

# 3.6 Modalità di spostamento nell'ambiente virtuale

Per lo spostamento dell'utente all'interno dell'ambiente virtuale, il cui termine tecnico è "locomozione", sono possibili diverse modalità di implementazione. Quelle prevalenti, come riportano gli autori del lavoro in [13], sono riportate di seguito.

- 1. Room-scale-based: l'utente può spostarsi nel mondo virtuale muovendosi fisicamente (camminando). Questa modalità è utilizzabile solo quando l'ampiezza del luogo fisico in cui l'utente si trova e può muoversi
  in sicurezza, senza ostacoli, è confrontabile a quella del luogo virtuale.
  Quando l'utente è immerso nella simulazione perde la percezione dei limiti fisici dell'ambiente in cui si trova, per questo i visori VR supportano
  una funzionalità, chiamata, "chaperone", che consiste nel rendere visibili
  all'utente i limiti da non oltrepassare, sotto forma di una griglia semitrasparente. I visori i cui controller contengono attuatori per i feedback
  aptici avvertono, inoltre, l'utente che sta per superare i limiti consentiti
  emettendo delle vibrazioni.
- 2. Motion-based: l'utente può spostarsi nel mondo virtuale muovendosi fisicamente (camminando sul posto). Questa soluzione può essere applicata a quei contesti in cui lo spazio virtuale deve trascendere le dimensioni di quello fisico (ad esempio, un tunnel). Questo è reso possibile da hardware specializzato, le cosiddette pedane omni-direzionali, che forniscono l'interazione più naturale, o dall'utilizzo di sistemi di tracking.
- 3. Controller-based: l'utente può spostarsi nel mondo virtuale tenendo in mano i controller e muovendo le proprie manipolatoria.

4. Teleportation-based: al contrario delle tipologie elencate preedentemente, questa tecnica, a cui d'ora in poi ci si riferirà con il termine "teletrasporto", realizza un movimento non continuo nello spazio virtuale. In questa modalità l'utente usa un controller per indicare un punto specifico dello spazio virtuale in cui vuole spostarsi ed il suo punto di vista viene istantaneamente spostato in quel punto. Questo si traduce nella sensazione dell'utente di sentirsi tele-trasportato.

L'ambiente riprodotto nella simulazione, cioè la cella didattica, non è di grandi dimensioni; dunque, un utente che abbia a disposizione uno spazio calpestabile in modo sicuro di  $3\times4$  m è teoricamente libero di andare ovunque nell'ambiente virtuale muovendosi nell'ambiente fisico. Tuttavia, per garantire che la simulazione possa essere eseguita anche avendo a disposizione uno spazio fisico molto ristretto, è stato anche previsto il tele-trasporto.

Si è scelto il tele-trasporto perché le altre modalità portano più facilmente alla generazione di sensazioni di malessere fisico nell'utente (camminata sul posto), richiedono più tempo per essere padroneggiate (controller-based), o sono inutilmente costose (treadmills, che non permettono comunque di effettuare il range di movimenti necessari per l'applicazione, in cui ci si deve molto spesso accovacciare o piegare).

#### 3.7 Interazioni

Programmare le interazioni, nell'ambito di simulazioni VR immersiva, vuol dire programmare:

- i modi in cui l'utente può modificare l'ambiente virtuale, ad esempio urtare, spostare, manipolare gli oggetti;
- i comportamenti complessi degli oggetti con cui l'utente interagisce;
- i modi in cui l'utente può utilizzare gli oggetti dell'ambiente per eseguire determinate operazioni;
- i modi in cui l'utente può utilizzare le simulazioni delle interfacce del sistema (ad esempio, lo SmartPad)
- le eventuali interfacce utente (menu contestuali, pannelli, ecc.).

Il modo in cui vengono progettate e realizzate le interazioni determina utilizzabilità ed ergonomia del sistema, che a loro volta influiscono sul carico

mentale sperimentato dall'utente. Se le interazioni non sono sufficientemente fluide, naturali e semplici da imparare [8], si rischia di distrarre l'utente dal processo di apprendimento e di generare frustrazione e ansia, sensazioni che influiscono negativamente sull'apprendimento.

#### 3.7.1 Interfacce fisiche e realismo delle interazioni

Allo stato attuale dello sviluppo delle tecnologie, la progettazione delle interazioni nell'ambiente virtuale non può essere condotta indipendentemente da quella delle interfacce fisiche da utilizzare, le scelte fatte nell'una influenzano l'altra in modo bidirezionale.

Il focus in questa fase di progettazione è sempre il livello di realismo che si vuole raggiungere. Quando si progetta un'interazione tra l'utente e l'ambiente virtuale, infatti, si opera un'astrazione. Più l'interfaccia fisica che l'utente utilizza si avvicina, come forma e funzionamento, all'oggetto reale con cui si sta simulando l'interazione, meno astratta è l'interazione. Ad esempio: nei simulatori di operazioni chirurgiche i controller generici sono sostituiti da interfacce fisiche costruite ad hoc per replicare gli strumenti che gli utenti andranno ad utilizzare nella realtà.

Il modo in cui gli utenti interagiscono con l'ambiente determina cosa essi possano imparare e come [14], dunque gli specifici obiettivi dell'addestramento determinano i tipi di interazioni necessarie per raggiungere il livello di fedeltà della simulazione richiesto per acquisire una corretta conoscenza ed evitare di trasmettere una conoscenza errata.

#### 3.7.2 Scelta delle interfacce fisiche

Date queste premesse, il problema che si è subito posto in fase di progettazione delle interazioni è stato come riprodurle nello scenario virtuale con un realismo sufficiente da garantire che l'utente riuscisse a comprendere a fondo il funzionamento degli strumenti per la calibrazione, poiché uno scorretto utilizzo oteva portare al danneggiamento degli stessi.

Dopo una fase iniziale in cui si è ipotizzato l'utilizzo di interfacce fisiche create ad hoc per simulare azioni come l'avvitamento dell'EMD o l'inserimento dei diversi connettori (ognuno con una modalità di inserimento specifica),

oltre ad una replica fedele dello SmartPad, si è deciso di optare per l'utilizzo di interfacce standard ( visore VR di alta fascia con i relativi controller), progettando le interazioni nel modo più realistico possibile e fornendo esplicitamente le indicazioni su come utilizzare correttamente gli strumenti.

#### Confronto tra dispositivi e scelta finale

Si è scelto di utilizzare il visore HTC Vive, tra i diversi visori per la VR, perché la qualità del suo sistema di tracking è stata ritenuta essere quella più adeguata per l'applicazione.

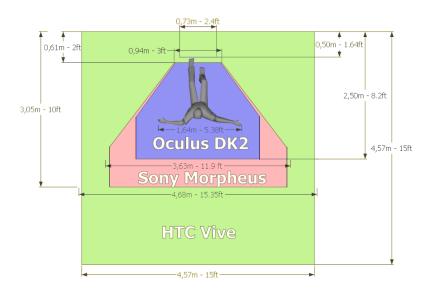


Figura 3.17: Confronto tra le differenti aree di tracking supportate dai diversi modelli di visori

#### Iside-out vs outside-in

Mentre gli altri dispositivi forniscono per la maggior parte un tracking di tipo inside-out, in cui la posizione e rotazione dei controller sono tracciate da sensori che si trovano all'interno del visore, quello del visore considerato è di tipo outside-in, perché la posizione e rotazione dei controller sono tracciate da sensori che si trovano in specifici dispositivi, le HTC vive base stations. Queste due tipologie di tracking comportano una serie di vantaggi e svantaggi e risultano in una differente ampiezza delle aree e dei movimenti che sono in grado di tracciare, come si vede in Figura 3.17. Durante l'esecuzione della

procedura di calibrazione l'utente deve muoversi continuamente intorno al robot, accovacciarsi ed osservare le tacche sugli assi mentre tiene in mano lo SmartPad. Questo tipo di movimenti è ampiamente supportato solo dal tracking di tipo outside-in del Vive.

#### Altre motivazioni

Si è scelto il Vive anche per la notevole risoluzione fornita dal modello Pro, insieme ad una buona ergonomia del visore, che risultano in una maggior immersione ed una migliore esperienza utente.

#### 3.7.3 Progettazione delle interazioni

#### Interazioni semplici

La maggior parte degli oggetti presenti nella scena sono interattivi ed hanno una specifica funzione.

Si è scelto di dare all'utente la possibilità di urtare e spostare gli oggetti entrando in collisione con essi con i controller, di prenderli, tenerli in mano, lasciarli cadere e lanciarli.

#### Interazioi complesse

Si è scelto di far eseguire avvitamenti, svitamenti, connessione di cavi in modo semplificato, come sarà chiarito nel capitolo sulla realizzazione.

Si è scelto di fare in modo che queste interazioni non debbano essere spiegate prima della procedura: la prima volta che l'utente si trova a dover eseguire un'operazione che richieda una di queste interazioni, è il sistema a guidarlo nell'esecuzione dell'interazione.

#### Simulazione dello SmartPad

Inizialmente, l'intenzione era di far interfacciare in tempo reale il programma con il sofware di programmazione remota KUKA.OfficeLite, che fornisce anche una replica dello SmartPad. Non essendo però possibile utilizzarlo per la procedura di calibrazione (che non può essere simulata dal software) si è deciso di creare una replica virtuale il più possibile fedele con cui l'utente potesse interagire in diversi modi attraverso i controller.

#### 3.8 Trasmissione delle informazioni

Nel contesto di un'applicazione per l'auto-apprendimento, la progettazione delle modalità con cui le nozioni da apprendere e le istruzioni per l'esecuzione delle operazioni vengono trasmesse all'utente è critica, in quanto ha impatto sull'efficacia dello strumento.

#### 3.8.1 Natura delle informazioni

Nel caso in esame, le informazioni che si ha l'obiettivo di far acquisire all'utente possono essere distinte in due macro gruppi:

- teoriche, esempio, a cosa serve la procedura di calibrazione;
- Pratiche/procedurali, esempio, come muovere un asse del robot.

#### 3.8.2 Trasmissione delle informazioni e apprendimento

Il modo in cui le informazioni vengono trasmesse deve stimolarne il più possibile l'apprendimento da parte dell'utente.

L'approccio che è risultato più efficace in tal senso, fino ad ora, è quello che sfrutta pienamente le potenzialità della VR, cioè quello multi-sensoriale: più canali sensoriali sono usati per trasferire le informazioni (bilanciandole per evitare un sovraccarico cognitivo), migliore sarà l'apprendimento nell'ambiente virtuale e, conseguentemente, la prestazioni degli utenti[8].

#### 3.8.3 Trasmissione diegetica vs non diegetica

Il termine "diegesi", applicabile a tutti quei contesti in cui avviene una narrazione, è utilizzato per indicare come gli elementi della narrazione siano situati rispetto all'universo fittizio raccontato: mentre gli elementi diegetici appartengono a tale universo, i non diegetici sono esterni ad esso.

In VR, gli elementi visivi diegetici sono oggetti che fanno parte dell'ambiente 3D, sono influenzati dalle forze fisiche ed interagiscono con gli altri oggetti in accordo con esse.

Per gli elementi audio valgono le stesse considerazioni: quelli diegetici sono emessi da specifici oggetti dell'ambiente 3D, dunque spazializzati e soggetti

alle leggi della fisica acustica, mentre quelli non diegetici sono di solito non spazializzati e chiaramente non generati dagli oggetti appartenenti all'ambiente [15].

Una voce narrante, dunque, è un elemento audio non diegetico.

#### Interfacce grafiche

Per interfaccia grafica, o Graphics User Interface (GUI), si intendono quegli elementi visivi che permettono di implementare:

- meccanismi che permettono all'utente di comunicare direttamente con il sistema ed influenzare il flusso della simulazione (ad esempio, menu da cui scegliere la modalità di gioco);
- meccanismi di interazione complessa con gli oggetti attraverso astrazioni e metafore (ad esempio, un menu per selezionare quale degli oggetti presenti nell'inventario virtuale si vuole utilizzare in un determinato momento)

Sono, date le definizioni precedenti, elementi visivi non diegetici le interfacce utente nella forma di pannelli, menu e bottoni fluttuanti o sovrapposti in primo piano sulla scena, posizionati relativamente all'utente, non al mondo 3D.

Anche nel caso in cui fossero mappati nello spazio 3D (ad esempio il menu per scegliere gli oggetti fosse mostrato da un tablet virtuale che l'utente ha in mano) non sarebbero definibili diegetici in quanto risulterebbero comunque essere elementi esterni all'ambiente ricreato, che di solito riproduce un ambiente reale.

Per evitare di ridurre il realismo della simulazione, sono state ridotte al minimo le interfacce utente non diegetiche.

#### 3.8.4 Modalità di trasmissione delle informazioni scelte

Per la realizzazione si sono scelte delle modalità non diegetiche per la realizzazione dell'esperienza didattica.

• Una voce guida per guidare l'utente nell'esperienza didattica. Ad essa, che svolge il ruolo di guida, compete comunicare tutte le informazioni teoriche necessarie, indicare la prossima azione da eseguire e guidare

passo-passo l'utente in quelle complesse, dare feedback sulla riuscita o meno di un'operazione, avvertirlo di un errore commesso.

• Indizi luminosi: oggetti che lampeggiano nel momento in cui sono nominati dalla voce guida e/o con cui l'utente deve interagire, frecce 3D che aiutano nella ricerca di determinati oggetti. Questo tipo di indizi sono un esempio di elemento visivo non diegetico (le frecce lampeggianti che compaiono per indicare degli oggetti non eseistono, per il momento, nella realtà), ma possono migliorare l'usabilità e l'efficacia dell'addestramento e dunque la prestazioni degli utenti [8].

#### 3.9 Storyboard

La fase di progettazione viene solitamente concretizzata nella realizzazione di uno *storyboard* dettagliato dell'intera esperienza didattica, che, insieme alle altre scelte progettuali, costituisce il punto di partenza per la successiva fase di realizzazione.

Nel caso di questo lavoro, si è proceduto in altro modo: sono stati progettati, realizzati e validati attraverso un confronto con gli istruttori diversi PoC di complessità incrementale, fino a giungere ad uno storyboard definitivo.

#### 3.9.1 Primo PoC

L'obiettivo era creare un ambiente con tutti gli oggetti e le funzionalità necessari per eseguire la calibrazione del robot, da validare facendolo provare agli istruttori KUKA, che dovevano verificare che i comportamenti del robot, le reazioni della simulazione agli errori e tutti gli altri comportamenti fossero corretti.

#### 3.9.2 Secondo PoC

L'obiettivo era l'introduzione della modalità di utilizzo chiamata *training*, in cui la voce guida supporta l'utente nello svolgimento dell'intera procedura. Non si tratta di auto-apprendimento perché presuppone l'aver acquisito precedentemente le conoscenze teoriche necessarie.

Questo PoC, utilizzabile in modalità multi-utente, è stato validato con gli istruttori.

#### 3.9.3 Terzo PoC

Si tratta della prima versione dello strumento utilizzabile per l'auto-apprendimento. Sono previsti tre stadi, descritti di seguito.

- *Pre-training*: per entrare in confidenza con lo strumento, acquisire le basi teoriche e pratiche per la movimentazione degli assi del robot, imparare le interazioni complesse (ad esempio, avvitamento dell'EMD).
- Self-training: per acquisire le basi teoriche e pratiche per eseguire la procedura di calibrazione.
- *Training*: per esercitarsi sulla procedura di calibrazione senza voce guida, che interviene solo nel caso in cui si commettano errori.

Sono stati aggiunti gli indizi luminosi che funzionano in sinergia con la voce guida. Oltre alla validazione con gli istruttori, c'è stata una prima validazione da parte di utenti non esperti: il PoC è stato esposto alla Maker Fair di Roma [16] ed al Festival della Tecnologia di Torino.

#### 3.9.4 Quarto PoC

In questo PoC è stata migliorata l'ergonomia delle interazioni ed aumentato il realismo fisico della scena (ad esempio, simulazione realistica dei cavi di alimentazione).

La validazione è avvenuta presso la sede KUKA: uno studente senza basi di robotica ha svolto un addestramento virtuale ed ha successivamente eseguito la procedura di calibrazione sul robot reale. Ciò ha permesso di verificare se la preparazione fornita dallo strumento fosse sufficiente ad affrontare la procedura reale e quali fossero le criticità sulle quali occorreva ancora lavorare.

#### 3.9.5 Quinto PoC e storyboard definitivo

Questa è la versione che è stata validata con i test sperimentali.

L'addestramento cerca di alternare il più possibile il più possibile i momenti di trasferimento di conoscenze teoriche con quelli in cui l'utente deve esercitarsi su una determinata operazione, per dare modo all'utente di avere immediatamente un riscontro pratico delle nozioni acquisite, per poterle fissare e contestualizzare.

Di seguito sono esposti tutti i passaggi del training, ognuno preceduto da (P) o (A), che indicano se si tratti di un momento, rispettivamente, di acquisizione passiva di conoscenza (spiegazione teorica) o di acquisizione attiva (esercizio pratico).

Come si vedrà leggendo lo storyboard, questa distinzione non è quasi mai netta: elementi teorici sono forniti nelle fasi pratiche ed azioni pratiche sono eseguite durante le spiegazioni teoriche.

#### Inizio

Alla partenza della simulazione l'utente si ritrova fuori dalla cella didattica, ad un paio di metri dalla porta, davanti la quale, poggiato per terra, c'è lo SmartPad.

In questo momento l'utente può liberamente entrare nella cella didattica, esplorarla ed interagire con gli oggetti presenti.

Lo SmartPad, però, non è ancora utilizzabile; la sua superficie è coperta dal menu iniziale contenente quattro voci: pre-training, self-training, training, assessment.

Per poterlo utilizzare è necessario prenderlo e selezionare una delle voci. Così facendo, il menu scompare ed è possibile utilizzare lo SmartPad. La selezione di una voce non comporta altri cambiamenti nella scena visibili dall'utente, ma imposta una determinata modalità di funzionamento della simulazione e, quindi, l'esperienza didattica che l'utente sperimenterà.

Di seguito, sono illustrati gli storyboard di ogni esperienza didattica, nell'ordine di utilizzo che è stato previsto e che è stato rispettato anche nei test.

#### **Pre-training**

1. **(P) Presentazione robot**: illustrazione degli elementi costitutivi del robot e della meccanica di funzionamento della movimentazione manuale.

Viene anche indicato il tasto di replay, un tasto che è stato aggiunto allo SmartPad e che l'utente può utilizzare per riascoltare l'ultima operazione che gli è stato chiesto di eseguire.

Questo tasto è un esempio di elemento di interfaccia utente implementata in modo diegetico: esso è inserito nello SmartPad e vi si interagisce come con gli altri tasti dello SmartPad.

2. (A) Movimentazione assi: viene chiesto di provare a muovere l'asse 1 premendo uno dei due tasti di movimento corrispondenti. Viene spiegato il motivo per cui l'asse non si è mosso, cioè il fatto che il pulsante di consenso non era stato premuto contemporaneamente ai tasti di movimento.

Viene chiesto all'utente di premere il pulsante di consenso osservando cosa accade contemporaneamente sullo SmartPad; successivamente viene chiesto all'utente di muovere almeno 3 assi per qualche secondo. L'esercizio è bloccante: finché non sono stati mossi 3 assi, l'utente non può procedere oltre.

Muovendo gli assi l'utente può accorgersi del rumore del motore del robot; questo elemento sarà fondamentale in seguito, quando i movimenti del robot saranno di pochi gradi e dunque sarà essenziale far riferimento all'udito per capire se il robot si stia muovendo o meno.

- 3. (A) Override: viene illustrata la funzionalità dei tasti per il cambiamento dell'override<sup>2</sup>; viene chiesto all'utente di portare l'override al 10% e di provare a muovere di nuovo 3 assi per verificare il cambiamento di velocità.
- 4. (A) Avvitamento EMD: viene chiesto all'utente di prendere l'EMD dalla valigetta aperta sul tavolino (l'utente non sa cosa sia l'EMD, dunque l'EMD lampeggia, in questo modo l'utente impara che quell'oggetto si chiama EMD) e di provare ad avvitarlo sull'oggetto simile ad una vite che sta lampeggiando.
- 5. (P) Introduzione concetto di cartuccia di calibrazione: viene spiegato che l'oggetto su cui l'utente ha avvitato l'EMD si chiama "cartuccia di calibrazione" (o "nottolino") e che ne esiste uno per ogni asse, specificando dove essi si trovano rispetto agli assi.
- 6. (A) Individuazione cartucce di calibrazione: viene chiesto all'utente di cercare le cartucce di calibrazione di tutti gli assi successivi e dimostrare di averle trovate avvitandovi sopra l'EMD. Questo esercizio è stato crato per rendere l'utente in grado di cercare in autonomia l'ubicazione dei nottolini sui vari assi e fissarne il ricordo eseguendo l'azione dell'avvitamento dell'EMD, con cui l'utente può quindi fare pratica.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Override è la velocità impostata dall'utente che viene sovrascritta (override) a quella di default (l'unità di misura è dunque espressa in percentuale).

Per aiutare l'utente ad individuare la cartuccia dell'asse successivo, viene fatto lampeggiare l'asse. Se dopo un certo numero di secondi l'utente non ha ancora avvitato l'EMD sulla cartuccia corretta, compare una freccia 3D che ne indica l'ubicazione. Quando l'utente avvita l'EMD sulla cartuccia corretta, l'asse smette di lampeggiare e l'utente riceve un feedback positivo dal voce guida che gli chiede di passare all'asse successivo, che a sua volta si illumina.

- 7. (A) Finestra dei messaggi: viene chiesto all'utente di osservare la finestra dei messaggi presente sullo SmartPad e spiegato che quando il robot non si muove nonostante si tengano premuti l'uomo morto e i tasti di movimento la prima cosa da fare è verificare se ci siano dei messaggi nella finestra, perché molti messaggi richiedono la conferma di avvenuta letture da parte dell'utente. Questa conferma viene effettuata premendo il tasto "Tutti OK", che compare insieme al messaggio. Viene mostrato sulla finestra dei messaggi un messaggio d'esempio e viene chiesto all'utente di selezionare il tasto "Tutti OK".
- 8. **Termine**: viene comunicato all'utente che il pre-training è terminato e sullo SmartPad compare il menu iniziale.

#### Self-training

1. (P) Cos'è la calibrazione, a cosa servono le tacche di misurazione e come usarle: viene spiegato che calibrare un robot consiste nell'attribuire ad ogni asse un valore di riferimento sulla sua posizione di zero meccanico e che tale operazione è fondamentale per garantire il funzionamento ottimale di un robot industriale; viene poi indicato con una freccia un punto dietro il robot in cui l'utente deve tele-trasportarsi. Una volta che l'utente si trova nel punto desiderato, gli viene chiesto di prestare attenzione alle due tacche di misurazione dell'asse 1, che lampeggiano e di provare a muovere l'asse per osservare il comportamento delle due tacche.

Viene spiegato che la prima operazione da eseguire per la calibrazione è portare tutti gli assi vicino al loro zero meccanico, che corrisponde alla posizione in cui le due tacche di un asse sono perfettamente allineate. Viene spiegato che per allinearle è comodo immaginare un piano che coincide con il lato sinistro della tacca che resta ferma e che l'asse è in tacca quando anche il lato sinistro della tacca che si sta muovendo coincide con il piano. Per facilitare l'utente, viene mostrato tale piano

per le tacche dell'asse 1.

Viene spiegato che anche per tutti gli altri assi una tacca si trova sull'asse da calibrare e l'altra si trova sull'asse precedente e che la loro forma può cambiare di asse in asse, facendo qualche esempio.

2. (A) Portare tutti gli assi in posizione di pre-calibrazione: viene chiesto di portare tutti gli assi in tacca, cioè in posizione di pre-calibrazione, procedendo in ordine crescente.

Questo esercizio ha due obiettivi principali: rendere l'utente in grado di cercare autonomamente le tacche di ogni asse applicando determinati criteri (viene ricordato che una si trova alla base dell'asse e l'altra si trova sull'asse precedente) e far sviluppare la manualità e sensibilità necessarie a mettere perfettamente in tacca ogni asse come pure verificare che un asse sia in tacca.

L'utente, infatti, non riceve un feedback quando l'asse che sta muovendo si trova in tacca, ma se prova a muovere un asse diverso da quello che deve essere messo in tacca viene ammonito e può procedere a muovere l'asse successivo solo dopo aver messo in tacca l'asse corrente.

In questa fase, l'utente non conosce l'ubicazione delle tacche degli assi successivi al primo, per cui viene forzato a cercarle: se cerca di muovere un asse trovandosi in una posizione che non gli permette di osservare da vicino l'allineamento delle tacche, l'asse non viene mosso e gli viene chiesto di avvicinarsi di più alle tacche, che vengono indicate da una freccia. Solo quando l'utente si trova sufficientemente vicino alle tacche, gli assi vengono mossi.

3. (A) Alimentazione dell'EMD e significato dei due led sullo SmartPad: viene spiegato che per procedere all'assegnazione dello zero meccanico di ogni asse c'è bisogno dell'EMD, quindi viene chiesto di avvitarlo all'asse 1.

Viene chiesto all'utente di osservare i due led che si trovano sullo Smart-Pad, che in questo momento sono di colore rosso, ed è spiegato che per eseguire la calibrazione entrambi i led devono essere (diventare) verdi.

Viene spiegato che il primo led diventa verde se l'EMD è connesso all'alimentazione e quindi viene chiesto all'utente di realizzare il collegamento dell'EMD all'alimentazione guidandolo passo-passo: connettore X32 alla presa di corrente, connettore X32.1 al trasformatore, connettore X32.2 al trasformatore, connettore restante all'EMD.

Ad ogni passasggio vengono illuminati i connettori da collegare e viene

indicato come collegarli correttamente.

4. (P) Significato del secondo led sullo SmartPad: viene chiesto all'utente di osservare nuovamente i led, ora entrambi verdi, e viene spiegato il significato del secondo led, che indica che l'asse su cui l'EMD è inserito si trova in area di calibrazione e che questa condizione è necessaria a garantire la riuscita della calibrazione.

Viene anche specificato che tale condizione non è tuttavia sufficiente: asse in area di calibrazione non è un sinonimo di asse in tacca e la calibrazione va a buon fine solo se l'asse è perfettamente in tacca. Viene quindi detto all'utente che al momento della calibrazione di un asse bisogna verificare che i due led siano verdi, ma anche controllare che l'asse sia in tacca osservando le due tacche.

5. (A) Calibrazione asse 1 e importanza della finestra dei messaggi: l'utente viene guidato nell'esecuzione della calibrazione vera e propria dell'asse 1. Gli viene chiesto di selezionare l'asse 1 dall'elenco degli assi da calibrare, premere il tasto Calibra sullo SmartPad, di osservare il messaggio che la finestra dei messaggi sta mostrando (che consiste nella prossima operazione da eseguire, cioè premere il tasto Start) e viene ricordata l'importanza di osservare la finestra dei messaggi, per avere informazioni su eventuali errori verificatisi o sulla prossima operazione da eseguire.

Viene spiegato cosa succederà nella fase successiva: tenendo premuto il tasto Start ed il pulsante di consenso l'asse si muoverà di un determinato numero di gradi, cercando il proprio zero meccanico.

Viene, infine chiesto di tenere premuti il tasto Start ed il pulsante di consenso finché il robot non smetterà di muoversi (l'utente se ne accorgerà non sentendo più il rumore del motore).

- 6. (P) Come capire se l'asse è stato calibrato: viene spiegato come capire se il tentativo di calibrazione sia andato a buon fine e i motivi per cui la calibrazione può non andare a buon fine (tra cui interrompere il movimento di calibrazione prima del termine).
- 7. (P) Dimostrazione della differenza tra asse in area di calibrazione ed asse in tacca: viene chiesto di osservare di nuovo il secondo led (che è ancora verde) e viene chiesto di osservare le due tacche dell'asse appena calibrato (che ora non sono più allineate). Viene spiegato che

il led è ancora verde perché l'area di calibrazione è più estesa dell'area nella quale l'asse è considerato in tacca e che, quindi, se l'asse si fosse trovato in questa posizione alla partenza della calibrazione, la calibrazione non sarebbe andata a buon fine (perché l'asse in questa posizione si trova oltre il proprio zero meccanico e dunque non può intercettarlo nel proprio movimento).

- 8. (A) Calibrazione asse 2: viene chiesto di svitare l'EMD dalla cartuccia avendo cura di staccare prima il suo cavo di alimentazione e di eseguire la calibrazione dell'asse 2. Vengono ricapitolati brevemente tutti i passaggi da eseguire e si lascia l'utente procedere.
- 9. (A) Calibrazione degli assi restanti: viene chiesto all'utente di procedere con la calibrazione degli assi successivi; gli si comunica che d'ora in poi non riceverà più indicazioni su come procedere, ma lo si rassicura sul fatto che, in caso di dubbio, il tasto Replay, se premuto, fornirà nuovamente le istruzioni.
- 10. **Termine e punteggio**: viene comunicato all'utente che la procedura di calibrazione è terminata; sullo SmartPad viene mostrato per un certo numero di secondi un pannello che mostra tempo impiegato, numero di assi calibrati correttamente, numero di tentativi di calibrazione di un asse falliti, numero di errori che portano al danneggiamento dell'EMD commessi.

Successivamente il pannello è sostituito dal menu iniziale.

#### Gestione degli errori

Lo storyboard illustrato corrisponde al "viaggio" di un utente che esegue in maniera ligia le istruzioni fornite, non commettendo errori.

In ogni fase del training vi sono però una serie di errori che l'utente ha la possibilità di commettere e per ognuno di tali errori il sistema ha diverse strategie di reazione a seconda della modalità in uso. Tali strategie sono descritte di seguito.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Nel dominio della User Experience si indica con "user journey", letteralmente "viaggio dell'utente", il racconto passo passo dell'esperienza tipo che un utente può avere utilizzando lo strumento.

• Intercettare l'utente quando sta per eseguire/eseguendo un'operazione scorretta, impedirgli di eseguirla e spiegare cosa comporterebbe commettere tale errore.

Esempio: perché la calibrazione sia corretta gli assi devono essere messi in tacca in ordine crescente. Se durante la fase di messa in tacca degli assi nel self-training l'utente cerca di muovere un asse diverso da quello che deve essere messo in tacca, il sistema gli impedisce di muoverlo e ne spiega il motivo.

Una gestione del genere è frutto di una specifica strategia di bilanciamento del carico cognitivo: se l'utente sta imparando una determinata operazione è molto probabile che la sbagli, ma sbagliandola deve anche imparare le conseguenze dell'errore e come recuperare da tale errore, rischiando di essere sovraccaricato di informazioni ed operazioni da imparare e di perdere il filo della logica a cui risponde la serie molto lunga di operazioni che sta imparando ad eseguire.

Commettere degli errori è essenziale per imparare; dunque, se nella modalità training l'utente commette lo stesso errore, il sistema non interviene e l'utente avrà modo di osservare le conseguenze di questo errore nel momento in cui si verificano.

- Lasciare che l'utente commetta l'azione scorretta, scatenare uno stato d'errore da cui l'utente può uscire solo riparando all'errore commesso. Esempio: svitare l'EMD da una cartuccia di calibrazione senza aver prima staccato il cavo di alimentazione può portare al danneggiamento dell'EMD. Nel pre-training e self-training, se l'utente svita e rimuove l'EMD dalla cartuccia con il cavo ancora attaccato, lo SmartPad diventa inutilizzabile perché coperto da un pannello d'errore, viene spiegato all'utente che rimuovere l'EMD in questo modo rischia di danneggiarlo e che per uscire dalla condizione d'errore senza poter procedere deve di nuovo inserire l'EMD sulla cartuccia e staccare il cavo e solo dopo procedere a svitare l'EMD. Quando l'utente, dopo aver riavvitato l'EMD, stacca il cavo, il pannello d'errore sullo SmartPad scompare. In questo modo l'utente impara l'esatta sequenza di operazioni da eseguire.
  - Questo è un errore grave, che non deve essere sottovalutato dall'utente, cosa che si rischierebbe di provocare permettendo all'utente di continuare il training; per questo motivo, nella modalità training e assessment questo errore comporta il termine dell'esperienza.
- Lasciare che l'utente commetta l'azione scorretta ed intervenire nel momento in cui si verificano le conseguenze di tale azione.

## Capitolo 4

### Realizzazione

Questo capitolo illustra gli aspetti legati alla realizzazione dello strumeto di addestramento.

#### 4.1 Software utilizzati

Si è scelto di realizzare l'applicazione con Unity[17], un software costituito da un motore grafico ed un ambiente di sviluppo integrato multi-piattaforma che consente lo sviluppo di videogiochi e altri contenuti interattivi, comprese applicazioni VR.

La scelta è stata dettata dal fatto che Unity, rispetto ai software alternativi, ha una gestione integrata dei dispositivi per la VR migliore, abilitata da un plug in[18] che permette di compilare applicazioni stand-alone compatibili con il software Steam VR[19], che a sua volta abilita un PC all'utilizzo dei dispositivi HTC Vive, con supporto anche per i dispoditivi Windows Mixed Reality.

Unity, inoltre, è attualmente il software più utilizzato per lo sviluppo di video-giochi ed applicazioni interattive ed uno store molto ricco di plug in ed estensioni lo rende uno strumento di sviluppo estremamente flessbibile e potente.

Un ulteriore punto di forza è l'integrazione, in Unity, del software di sviluppo multipiattaforma Windows Visual Studio con cui è possbile programmare le logiche delle applicazioni in linguaggio C#.

Unity versione 2018 è stato utilizzato per la creazione della scena virtuale e l'implementazione di tutta la logica dell'applicazione, compresa la gestione dei dispositivi VR.

#### 4.2 Ambiente virtuale

In questa sezione è descritto come è stato generato l'ambiente virtuale.

#### 4.2.1 Oggetti

I modelli 3D della maggior parte degli oggetti che costituiscono l'ambiente virtuale sono stati estratti dal software di simulazione KUKA.SimPro e successivamente elaborati con il software di modellazione 3D Blender. Con Blender sono anche stati modellati gli oggetti contenuti nella valigetta di calibrazione e la valigetta stessa, non presenti nel KUKA.SimPro.

Tutti gli oggetti sono stati successivamente importati in Unity per assemblare la scena.

#### 4.2.2 Audio

Unity offre supporto per l'audio spazializzato. Fornisce la possibilità di assegnare agli oggetti delle sorgenti sonore e dare all'utente la sensazione che un determinato rumore sia emesso da un determinato oggetto, perché l'audio viene renderizzato analogamente a come viene renderizzato il colore degli oggetti in base alle caratteristiche del materiale e l'illuminazione della scena, dove per l'audio valgono le caratteristiche di assorbimento dei materiali, le caratteristiche del suono emesso, oltre alla posizione in cui l'oggetto che lo emette si trova rispetto all'utente.

Dei diversi rumori che si era scelto di includere nella simulazione, si è avuto modo di aggiungere solo il rumore del motore del robot, generato sinteticamente per avere un suono quanto più possibile simile all'originale (impossibile da registrare per via del rumore di fondo presente nel KUKA College) e per poter avere un campione riproducibile in loop.

Un ulteriore suono che si voleva aggiungere era il "click" che il robot emette quando si preme/rilascia il pulsante di consenso, anch'esso da generare sinteticamente per uniformarlo con l'altro.

#### 4.2.3 Fisica dell'ambiente

Tutti gli oggetti Unity sono stati dotati di *collider* e di *RigidBody* per garantire che il comportamento dell'ambiente fosse realistico dal punto di vista fisico.

Gli oggetti che permettono una serie di interazioni complesse all'utente sospendono in determinati momenti la loro capacità di interagire con il mondo fisico, come si vedrà nella sezione dedicata alle interazioni con gli oggetti.

Per implementare i cavi di alimentazione è stato utilizzato un plug in apposito [20] che permette di creare simulazioni fisicamente realistiche di cavi/corde.

#### 4.3 Architettura e moduli funzionali

Lo schema in figura 4.1 rappresenta l'architettura logica dell'applicazione, in termini di moduli funzionali.

La struttura di un progetto in Unity è articolata in scene costituite da oggetti che implementano le diverse funzionalità dell'applicazione. Non esiste il concetto di modulo software in Unity, ma di oggetto che realizza un determinato comportamento, per cui questo schema logico è stato implementato in una serie di comportamenti effettuati dai diversi oggetti.

Il modulo funzionale indicato con FSM (Finite State Machine), costituisce la logica centrale che gestisce il flusso della simulazione interagendo con i diversi moduli funzionali.

Questa interazione avviene in due modi:

- 1. attraverso la condivisione delle variabili di stato con gli atri moduli, che possono leggerle e anche scriverle;
- 2. chiedendo ai diversi moduli di eseguire determinate operazioni.

# 4.4 Interazioni con gli oggetti del mondo virtuale

In questa sezione viene illustrata l'implementazione delle interazioni, per mezzo dei controller dell'HTC Vive, con gli oggetti dell'ambiente virtuale.

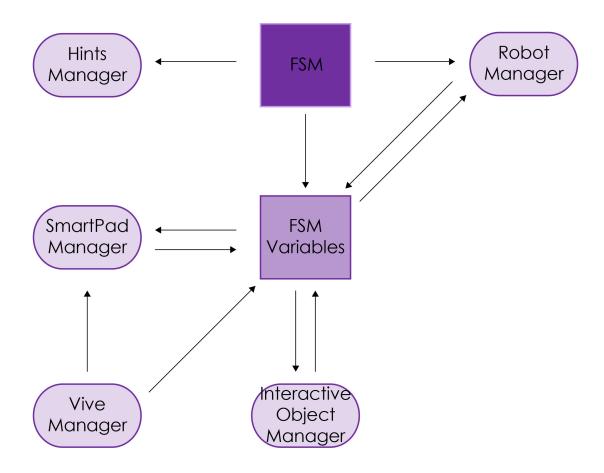


Figura 4.1: Architettura logica dell'applicazione

#### 4.4.1 I controller HTC Vive e SteamVR

I controller HTC Vive forniscono all'utente, come mostra la Figura 4.2, un'interfaccia costituita da:

- 1. pulsante menu;
- 2. Trackpad;
- 3. pulsante di sistema;
- 4. led;
- 5. porta micro-USB;
- 6. sensore di tracking;

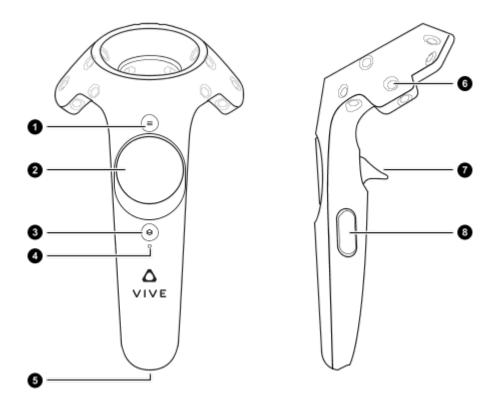


Figura 4.2: I pulsanti dei controller Vive

#### 7. pulsante trigger;

#### 8. pulsante gripper.

Il plug in di SteamVR fornisce una serie di classi che implementano i meccanismi essenziali per il tracking dei controller e l'interazione con gli oggetti della scena, che possono essere specializzate in modo da implementare interazioni più sofisticate.

#### 4.4.2 Interazioni con gli oggetti

Per abilitare le interazioni con gli oggetti attraverso i controller, il plug in di SteamVR fornisce gli script *Interactable.cs* e *Throwable.cs* che, aggiunti ad un oggetto della scena che abbia un collider ed un RigidBody, lo rendono in grado di essere "preso" avvicinando ad esso un controller e premendo il tasto trigger.

Agli oggetti interattivi (come EMD, connettori, ecc.) sono stati aggiunti Interactable.cs ed una versione modificata di Throwable.cs, chiamata EMD\_Throwable.cs, che ha svolto il ruolo del modulo funzionale "Interactive Object Manager". EMD\_Throwable permette di definire se un oggetto è di tipo avvitabile o meno, di assegnare determinati comportamenti all'oggetto nel momento in cui viene preso o rilasciato e di gestire diversi tipi di situazioni.

#### Oggetti avvitabili

EMD\_Throwable.cs permette di indicare se un oggetto sia avvitabile o meno.

Se un oggetto è avvitabile, gli oggetti su cui esso può essere avvitato sono dotati dello script CheckCollisions.cs, che contiene un riferimento all'oggetto avvitabile. In CheckCollisions.cs la cui funzione OnTriggerEnter() viene chiamata ogni volta che un collider di tipo istrigger collide con il trigger dell'oggetto a cui lo script è stato aggiunto. Se l'oggetto con cui è entrato in cliisione corrisponde a quello di cui esso ha il riferimento, allora esegue l'avvitamento dell'oggetto: viene fatta partire un'animazione dell'avvitamento dell'oggetto, che viene imparentato all'oggetto a cui è stato avvitato.

Svitare un oggetto avvitato avviene in due fasi: interagendo con l'oggetto come si farebbe per prenderlo (avvicinandosi e premendo il trigger), viene attivata l'animazione inversa, alla fine della quale diventa di nuovo possibile prendere l'oggetto.

Lo script CheckCollisions viene utilizzato anche per gli oggetti che devono essere collegati insieme, senza avvitamento (ad esempio, il connettore alla presa di alimentazione).

La funzione OnTriggerEnter() dello script CheckCollisions, inoltre, è abilitata per avere una blacklist di oggetti: se l'oggetto che è entrato in collisione con quello su cui lo script è stato aggiunto è nella blacklist, vengono eseguite delle specifiche funzioni d'errore. Questo meccanismo è stato utilizzato per scatenare un errore quando l'utente cerca di inserire un connettore su una presa sbagliata.

#### 4.4.3 Tele-trasporto

Il plug in di SteamVR fornisce un'implementazione del tele-trasporto, utilizzabile in due modalità: una prevede che vengano definiti specifici punti

della scena dov'è possibile tele-trasportarsi, l'altra prevede che l'utente possa tele-trasportarsi a piacimento in qualunque punto di un'area precedentemente definita.

Nell'applicazione è stata utilizzata la prima modalità e sono stati definiti dei punti chiave della scena in cui l'utente può tele-trasportarsi in questo modo: quando viene tenuto premuto il trackpad di un controller, i teleport points diventano visibili e dal controller viene generato un raggio il cui punto di intersezione con il pavimento virtuale determina il punto in cui l'utente sarebbe teletrasportato se lasciasse in quel momento il trackpad; tale raggio è verde se il punto di intersezione con il pavimento virtuale si trova all'interno dell'area di un teleport point, rosso in caso contrario ed al rilascio del trackpad l'utente viene teletrasportato solo se il raggio è verde, in caso contrario scompaiono i teleport points ed il raggio.

#### Problematiche del tele-trasporto con ObiRope

Durante il corso della simulazione l'utente si trova spesso a doversi teletrasportare con i cavi in mano e ciò ha costituito un problema.

I cavi realizzati con ObiRope non sono degli oggetti come gli altri ma dei sistemi particellari con dei comportamenti sofisticati ed in quanto non oggetti non possono essere presi e spostati. Ciò che può essere spostato sono gli oggetti a cui i capi dei cavi sono "attaccati" (Il cavo non è imparentato a questi oggetti, il legame è implementato internamente in ObiRope), cioè i connettori. Ma cosa succede se ci si teletrasporta con un solo connettore in mano? Il cavo dovrebbe trascinare con se anche l'altro connettore o si dovrebbe totalmente impedire questo comportamento?

Si è deciso di impedire tale comportamento e per farlo è stata implementata una precisa gestione del teleport degli oggetti con cavo in EMD\_Throwable, che risulta in questo comportamento: se l'utente si vuole teletrasportare con un solo connettore in mano, il connettore viene automaticaente rilasciato prima che il tele-trasporto inizi, se, invece, anche l'altro connettore è tenuto in mano dall'utente, allora i due connettori ed il cavo si teletrasportano con lui. Anche questo comportamento generava dei problemi, che sono stati risolti specializzando ancor di più EMD\_Throwable per la gestione del teletrasporto di oggetti con cavo e creando uno script ulteriore per la gestione del tele-trasporto dei cavi.

#### 4.4.4 Interazioni con lo SmartPad

Lo SmartPad è stato realizzato sovrapponendo ad un modello 3D molto semplice dello SmartPad un *Canvas*, in cui dei *buttons* simulano i bottoni fisici e quelli virtuali che compaiono sul TouchScreen e dei TextMesh Pro implementano la finestra dei messaggi e le altre caselle di testo.

Differentemente da tutti gli altri oggetti della scena, lo SmartPad ha un suo throwable specializzato, chiamato TP\_Throwable, che implementa in un altro modo l'interazione di rilascio dell'oggetto: quando viene rilasciato il trigger gli oggetti che sono in mano vengono lasciati cadere, mentre nel caso dello SmartPad, una volta che esso è in mano non può cadere se viene rilasciato il trigger. Per lasciarlo è necessario premere e rilasciare velocemente il trigger.

Questo comportamento è stato realizzato perché lo SmartPad viene tenuto in mano a lungo e tenere a lungo il trigger premuto genera del fastidio e dell'indolenzimento alla mano.

Per l'interazione con i tasti dello SmartPad virtuale è stata utilizzata una modalità di interazione chiamata "Laser Pointer": quando l'utente tiene lo SmartPad con un controller, se fa puntare l'altro controller in direzione dello schermo dello SmartPad, dalla punta del secondo controller viene emesso un raggio virtuale simile ad un laser. Quando un bottone viene colpito da questo laser, viene evidenziato e se l'utente preme il trigger viene selezionato. Questo comportamento è stato realizzato utilizzando lo script SteamVR\_LaserPointer per il rendering del raggio laser ed uno script realizzato ad hoc, chiamato MyRaycast, per la gestione della selezione e deselezione dei diversi tipi di bottoni.

La simulazione del pulsante di consenso è stata realizzata con il tasto *grip*per del controller: il pulsante di consenso è il gripper del controller con cui l'utente sta impugnando lo SmartPad. Questo vuol dire che se l'utente preme il gripper di un controller che non impugna lo SmartPad la sua azione non risulta come pulsante di consenso premuto.

Per mappare più azioni sui tasti del controller (ad esempio, il trigger utilizzato sia per prendere gli oggetti che per selezionare con il raycast), è stato realizzato un module, chiamato ViveManager.cs, che ad ogni update controlla se lo SmartPad è tenuto in mano dall'utente ed in quel caso verifica se il trigger dell'altra mano è stato premuto/rilasciato e se il gripper della stessa

mano è stato premuto/rilasciato ed aggiorna le variabili della FSM che memorizzano lo stato del pulsante di consenso e lo stato del trigger inteso come selezionatore dei tasti sullo SmartPad.

Il modulo ViveManager.cs implementa il modulo funzionale con lo stesso nome.

#### 4.4.5 Logica dello SmartPad

Quello che succede quando un tasto viene premuto consiste, nella maggior parte dei casi, nel settaggio di qualche variabile della FSM, con l'eccezione dei due tasti per la variazione dell'override, che chiamano una funzione del modulo che gestisce il movimento del robot, che verrà trattato in seguito. Inoltre, lo script TPmessagad esempio,cs gestisce la finestra dei messaggi e Button2Axis.cs gestisce l'elenco degli assi (che sono dei bottoni).

I moduli per la gestione della logica e dell'interazione con lo SmartPad implementano il modulo funzionale chiamato "SmartPad manager".

#### 4.4.6 Menu iniziale

Il menu iniziale è un canvas, le cui voci sono dei semplici bottoni. Quando viene selezionata una delle voci viene disabilitato quel canvas ed abilitato il canvas che implementa lo SmartPad.

#### 4.4.7 Pannello d'errore

Il pannello d'errore che viene mostrato nel caso si verifichino determinate condizioni d'errore è implementato come un semplice canvas con un messaggio d'errore, alla cui attivazione viene disattivato il canvas che implementa lo SmartPad.

#### 4.5 Comportamento del robot

Lo script RobotMover.cs, che implementa di fatto il modulo funzionale chiamato "Robot Manager", fornisce tutte le funzioni necessarie per la ione manuale e la calibrazione del robot, tra cui le principali sono

• ManualMoveAxis: riceve in input l'indice dell'asse da muovere e la direzione e muove l'asse di un numero di gradi determinato dal valore dell'override e normalizzato per evitare comportamenti diversi a seconda del frame rate dell'applicazione, mantenendo tale rotazione entro i limiti del finecorsa (gli assi non ruotano oltre un limite inferiore e superiore).

Dopo aver mosso l'asse verifica se questo sia in area di calibrazione e in tacca, mantenendo il risultato di questo check in una struttura dati interna.

- MoveAxis: da non confondere con la funzione precedente, questa riceve in input l'indice dell'asse da muovere e lo muove di un numero di gradi determinato dalla velocità di calibrazione impostata. Questa funzione viene chiamata per eseguire il movimento dell'asse in fase di calibrazione.
- Calibration: riceve in input l'indice dell'asse (che si sta calibrando) e, se la distanza percorsa dall'asse dall'inizio della sua calibrazione (cioè, per intenderci, quando è stato premuto il tasto "Start") fino a quel momento è inferiore alla distanza massima percorribile in fase di calibrazione, chiama MoveAxis.

Successivamente verifica se l'EMD si trova ancora in area di calibrazione e salva il risultato della verifica in una variabile della FSM.

Infine verifica se ha superato lo zero meccanico ed in caso affermativo, se l'EMD si trova sulla cartuccia di misurazione dell'asse corretto, l'asse era perfettamente i tacca all'inizio della calibrazione, ritiene l'asse calibrato.

In tutti i casi diversi da quelli elencati, valuta la calibrazione come fallita.

Infine setta una variabile della FSM ed aggiorna una sua struttura dati interna in cui tiene traccia di quali assi sono calibrati.

Nel caso in cui Le altre funzioni che completano l'interfaccia sono quelle che permettono di cambiare il valore dell'override.

#### 4.6 Logica centrale dell'applicazione

Nel caso in cui l'applicazione fosse una semplice simulazione dell'operatività del robot, la FSM sarebbe i moduli presentati fino ad ora, uniti ad una

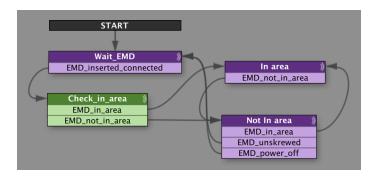


Figura 4.3: FSM che gestisce ile led dello SmartPad che indica se l'EMD si trova in area di calibrazione

struttura dati contenente una serie di variabili di stato e a poche ulteriori funzioni di servizio, sarebbero sufficienti ad implementare le funzionalità necessarie. Ad esempio, la selezione di un tasto di ione manuale potrebbe generare la chiamata ad una funzione aggiuntiva di RobotMover.cs che verifica se la variabile di stato relativa al pulsante di consenso è settata ed in caso affermativo chiama la funzione ManualMoveAxis.

Questa applicazione, invece, deve implementare comportamenti molto più complessi e per questo si è scelto di utilizzare il plug in Playmaker[21], che abilita la creazione di logiche di gioco con un editor a blocchi che permette di realizzare FSM anche molto complesse e poterne eseguire il debugging in modo molto agevole.

Ogni modalità di training (pre-training, self-training, training) ha il suo specifico set di diverse FSM e quello che accade quando si seleziona una voce tra quelle del menu iniziale è che vengono attivate le FSM relative a quella modalità.

In Figura 4.3 e 4.4 sono mostrate, rispettivamente, una delle FSM meno complesse ed una delle FSM più complesse utilizzate.

#### 4.6.1 Comunicazione abilitata dalle variabili

Playmaker è un editor a blocchi ma fornisce anche un'interfaccia per gli script esterni, in particolare, permette di leggere e scrivere le sue variabili interne da codice.

Grazie a questa possibilità offerta, è stato implementato un metodo molto veloce di comunicazione tra FSM e altri moduli.

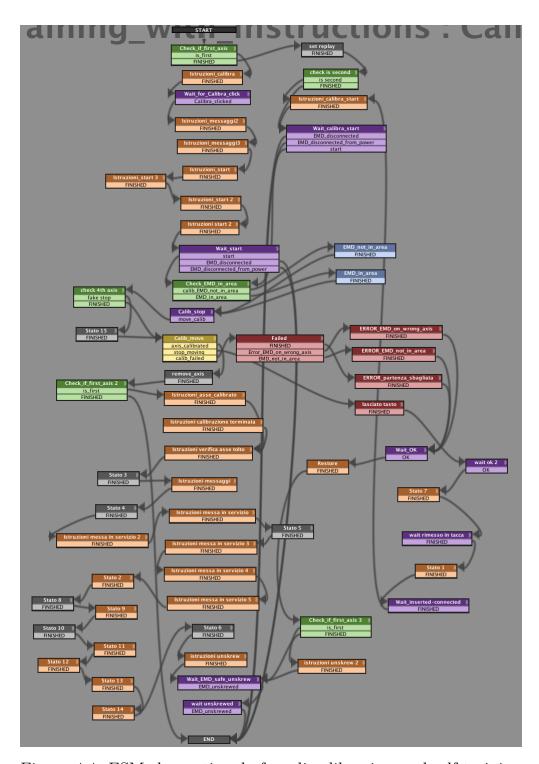


Figura 4.4: FSM che gestisce la fase di calibrazione nel self-training

E' stato creato uno ScriptableObject, chiamato FSMVariables contenente solo delle properties i cui getter e setter, rispettivamente, ritornano e settano le variabili della FSM. Ogni volta che viene introdotta una variabile in una FSM, se questa deve poter essere letta e/o scritta dagli altri moduli, viene aggiunta una property a FSMVariablad esempio,

#### 4.6.2 Implementazione del training

#### Voce guida

Le frasi pronunciate dalla voce guida sono state tutte precedentemente generate con un programma online di Text to Speech e si presentano della forma di di file mp4 separati.

La sorgente audio che riproduce questi file non è spazializzata (Unity fornisce entrambe le modalità), dunque l'utente percepisce la voce guida nello stesso identico modo ovunque si trovi, in un layer sovrapposto a tutti gli altri.

#### Indizi luminosi

Un modulo chiamato DirectionHints.cs contiene i riferimenti a tutti i diversi oggetti che implementano gli indizi visivi e fornisce le funzioni per attivarli e disattivarli, che sono chiamate nei diversi stati della FSM.

#### 4.7 Supporto per modalità multi-utente

La modalità multi-utente è garantita dall'aver utilizzato, in fase di realizzazione, la libreria UNet, che costituisce il supporto nativo offerto da Unity per realizzare applicazioni multi-utente utilizzabili sulla stessa rete locale.

## Capitolo 5

# Valutazione sperimentale presso il KUKA College

Nel mese di Gennaio 2020 è stata condotta una ricerca sperimentale attraverso uno studio condotto su alcuni utenti presso le sede di Grugliasco del KUKA College. L'obiettivo era quello di confrontare l'efficacia di un addestramento sulla procedura di calibrazione svolto per mezzo dell'applicazione VR con quella di un addestramento svolto nella modalità tradizionale.

Mentre, in letteratura, la modalità con cui questi confronti vengono effettuati è sempre la stessa, cioè confrontare gli esiti di apprendimento di due gruppi di utenti che vengono coinvolti in due tipologie di addestramento differenti[4], non sono ancora state standardizzate delle modalità di valutazione dei risultati di apprendimento ottenuti con l'utilizzo di tecnologie VR [1]. Dunque le metriche di valutazione variano molto a seconda delle applicazioni considerate.

Sono, invece, standardizzate le modalità di valutazione soggettiva del carico cognitivo sperimentato dagli utenti durante un'esperienza di addestramento e dell'ergonomia delle applicazioni VR, che sono in genere affiancate da questionari per la valutazione soggettiva dell'esperienza da parte degli utenti.

In questo lavoro, si è scelto di confrontare le due tipologie di addestramento sulla base di metriche oggettive e soggettive, illustrate nei prossimi paragrafi insieme alle modalità di svolgimento delle prove sperimentali.

#### 5.1 Metodologia

Gli esperimenti sono stati svolti in tre giornate, in cui 18 utenti, suddivisi in due gruppi, VRG (VR Group) e STG (Standard Training Group) hanno partecipato volontariamente a sessioni di training e di valutazione così organizzate.

- 1. Accoglienza in sede.
- 2. Questionario preliminare.
- 3. Addestramento.
- 4. Questionari Post-addestramento.
- 5. Quiz teorico Post-addestramento.
- 6. Questionario aggiuntivo per gli utenti del VRG.
- 7. Esame pratico: esecuzione della procedura di calibrazione su un robot reale, con valutazione oggettiva e soggettiva effettuata da un istruttore KUKA.
- 8. Questionario post-esame.

I questionari sono la metodologia con cui sono stati raccolti i dati relativi alle metriche soggettive: prima e dopo la fase di formazione e dopo l'esame pratico, ogni utente doveva rispondere individualmente ad una serie di domande che andavano ad indagare la sua esperienza da vari punti di vista.

#### 5.1.1 Questionario preliminare

Si tratta del questionario somministrato ad ogni utente con l'obiettivo di raccogliere dati demografici e soggettivi: informazioni sulle conoscenze ed esperienze pregresse in ambito robotico, motivazione ad apprendere la procedura di calibrazione, confidenza con le tecnologie VR per il gruppo VRG.

#### 5.1.2 Addestramento

#### VRG

Questo addestramento è avvenuto nel pomeriggio della prima e seconda giornata e nell'intera terza giornata.

Ad ogni utente è stata data la possibilità di familiarizzare con il controller che avrebbe utilizzato, indicando quali tasti sarebbero stati utilizzati nella simulazione, come utilizzarli e per realizzare quale interazione.

Successivamente è stato fatto indossare il visore, senza le cuffie, è stata fatta partire la simulazione ed è stato chiesto loro di tele-trasportarsi davanti la porta della cella, prendere lo SmartPad che si trovava a terra e selezionare dal menu iniziale la modalità pre-training.

Questo ha dato modo agli utenti di provare tutte le interazioni virtuali principali (tele-trasporto, presa, selezione con laser) ed entrare in confidenza con tutte le modalità di utilizzo del controller. In questa fase sono stati supportati da un supervisore, è stato ricordato loro quale tasto utilizzare per una determinata interazione e si è risposto ai loro dubbi.

Gli utenti che non avevano mai provato precedentemente la VRI hanno avuto la possibilità di entrare gradualmente in confidenza con l'interfaccia sperimentando per qualche minuto con la "stanza" di steamVR<sup>1</sup>. Successivamente è stata fatta partire la simulazione.

Al momento della selezione della modalità pre-training, sono state fatte indossare le cuffie, ricordando agli utenti che la presenza degli esaminatori avrebbe garantito la loro incolumità e che, da quel momento in poi, gli esaminatori li avrebbero supportati solo in problematiche specifiche all'uso dell'interfaccia, non fornendo alcun aiuto nello svolgimento delle operazioni previste dalla simulazione.

Al termine del pre-training, dopo essersi assicurati che gli utenti non avessero malessere, è stata di nuovo fatta partire la simulazione ed è stato chiesto di selezionare dal menu la modalità self-training.

#### STG

Questo training è avvenuto nella mattina del primo e del secondo giorno. Le modalità erano quelle del corso di formazione che viene effettuato di solito nel KUKA College, gli argomenti affrontati erano la ione manuale e la calibrazione, preceduti dalla parte di sicurezza.

Gli studenti, a cui erano stati forniti un foglio ed una penna per poter prendere appunti, hanno seguito le lezioni frontali in aula e svolto le esercitazioni sui robot in gruppi di 3 persone.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Quando viene collegato il visore HTC Vive al PC, SteamVR fa automaticamente partire un'applicazione consistente in una stanza molto grande, in cui si può interagire con alcuni oggetti, spostandosi da un punto all'altro con il tele-trasporto.

Le esercitazioni pratiche erano sulla ione manuale e sulla calibrazione, in particolare nell'esercitazione sulla calibrazione l'istruttore ha eseguito la calibrazione dell'asse 1 ed ha lasciato che gli studenti si esercitassero ognuno sulla calibrazione di 2 assi.

#### 5.1.3 Questionari Post-addestramento

#### Questionario di valutazione soggettiva dell'esperienza

Il questionario mirava a raccogliere le valutazioni soggettive degli utenti sull'addestramento appena svolto, concentrandosi su:

- Capacità dell'addestramento di stimolare la curiosità dell'utente e di mantenerne alta l'attenzione;
- Qualità del trasferimento delle informazioni in termini di noia generata nell'utente;
- Rilevanza che lo svolgere l'addestramento aveva per l'utente, ovvero la motivazione dell'utente l'interesse verso gli argomenti trattati;
- Livello di confidenza sperimentato durante l'addestramento, cioè quanto gli utenti si son sentiti, durante l'addestramento, in grado di terminarlo con profitto, quante difficoltà hanno riscontrato, quanto sono riusciti a comprendere degli argomenti affrontati;
- Livello di soddisfazione rispetto all'addestramento appena svolto;
- Aspettativa di apprendimento(self-efficacy), cioè l'aspettativa di riuscire a svolgere correttamente la procedura di calibrazione alla luce delle competenze apprese durante l'addestramento.

#### Questionario NASA-TLX

Il carico mentale e fisico possono influenzare la prestazioni e l'apprendimento dell'utente [8]. Il NASA-TLX è uno strumento realizzato per eseguire una valutazione soggettiva del carico cognitivo sperimentato dagli utenti nell'uso di sistemi di interfaccia uomo-macchina [22][23][24]. È essenzialmente uno strumento che valuta il carico cognitivo sperimentato nell'esecuzione di operazioni ed è stato somministrato ad entrambi i gruppi per poterne confrontare i risultati.

L'output consiste in un punteggio complessivo calcolato come una media pesata dei punteggi ottenuti su sei scale secondarie, riportate in seguito.

- Mental demand: attività mentale e percettiva richiesta (pensare, decidere, calcolare, ricordare, guardare, cercare, ecc.).
- Physical demand: attività fisica richiesta (spingere, tirare, girare, controllare, attivare, ecc.).
- Temporal demand: quanto fortemente si è sperimentata una pressione di tipo temporale .
- Prestazione: quanto l'utente è soddisfatto della propria prestazione e quanto è convinto di aver raggiunto gli obiettivi.
- Effort: quanto sforzo (mentale e fisico) è stato necessario per raggiungere il livello di prestazioni che l'utente si era prefissato.
- Frustration: quanto l'utente si è sentito insicuro, scoraggiato, irritato stressato e infastidito, piuttosto che sicuro, gratificato, soddisfatto, rilassato e compiaciuto.

Lo si è utilizzato in una versione Web [25].

## 5.1.4 Questionari aggiuntivi per gli utenti del VRG

Un VRTS deve sempre essere anche valutato in termini di Usabilità e User Experience[8]; pertanto, gli utenti del VRG hanno risposto ad ulteriori domande.

#### SUS

Il System Usability Scale (SUS) è uno strumento efficace per valutare l'usabilità di un prodotto, sia hardware che software, indipendentemente dalle tecnologie e per questo diventato uno standard industriale. Produce un unico punteggio tra 0 e 100 dalle risposte date dagli utenti a 10 domande. In questo lavoro è stata utilizzata la versione originaria proposta in [26].

#### Questionario

Un ulteriore questionario è stato utilizzato per indagare la User Experience nei termini riportati di seguito.

- Usabilità: quanto controllo l'utente ha percepito di avere sulla simulazione, compresa la capacità di riconoscere di stare commettendo errori e di recuperare da essi.
- Immersione e presenza: quanto l'utente ha sperimentato immersione e presenza.
- Informazioni fornite: quanto le informazioni fornite attraverso la voce guida e le indicazioni visive sono state chiare e di qualità.

#### 5.1.5 Quiz teorico Post-addestramento

Il quiz consisteva in 7 domande a risposta multipla riguardanti le conoscenze teoriche fondamentali che l'addestramento aveva l'obiettivo di far acquisire, da completare in 5 minuti.

L'obiettivo era quello di valutare e confrontare la capacità di comunicare e stimolare l'apprendimento di conoscenze teoriche delle due tipologie di addestramento.

# 5.1.6 Esame sul robot e valutazione oggettiva e soggettiva

Dopo aver svolto l'addestramento e risposto ai questionari, ogni utente<sup>2</sup> ha eseguito l'intera procedura di calibrazione su un robot, che era stato precedentemente scalibrato ed i cui assi erano stati portati ad una certa distanza dallo zero meccanico, diversa per ogni asse.

A differenza degli utenti STG, gli utenti VRG non erano ancora mai entrati nella cella didattica; pertanto, prima del loro ingresso nella cella sono state date loro delle indicazioni essenziali su determinate accortezze da avere con gli strumenti di calibrazione ed è stata loro indicato il funzionamento del pulsante di consenso.

L'esaminatore, presente per effettuare la valutazione dell'esecuzione della procedura, non guidava né aiutava l'utente, ma vigilava sul suo comportamento per garantirne l'incolumità ed evitare danni all'attrezzatura.

Per la valutazione, l'esaminatore disponeva di un foglio, in appendice B, su cui annotare le valutazioni di specifici parametri.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Gli altri utenti in attesa si trovavano in un altro ambiente del KUKA College per evitare che osservassero la procedura.

#### Valutazione: parametri oggettivi

- Tempo di completamento: un metodo molto utilizzato per valutare la prestazioni dell'utente nell'eseguire una procedura consiste nel misurare il tempo richiesto per portarla a completamento. L'unità di misura potrebbe essere una singola azione (preferibilmente se intesa come reazione o risposta a qualcosa) o una misura per il completamento di un'operazione semplice o di un insieme di operazioni [8]. Nel caso in questione, l'esaminatore doveva annotare il tempo di completamento dell'intera procedura, che iniziava dall'apertura della porta della cella didattica e terminava al termine della calibrazione dell'asse 6, e di specifiche operazioni intermedie (apertura porta, messa in tacca di tutti gli assi, calibrazione del primo asse).
- Numero di errori commessi: per un elenco di errori gravi (cioè che richiedevano un intervento da parte dell'esaminatore per fermare l'utente perché avrebbero provocatoun danno alle attrezzature) e non gravi stabilito in precedenza insieme agli istruttori.

#### Valutazione: parametri soggettivi

Un'altra metrica utilizzata comunemente per valutare la prestazioni nell'e-sezuzione di una procedura è l'accuratezza [8], che non ha un metodo di valutazione standard.

In questo caso, l'esaminatore doveva assegnare un voto da 0 a 10 su quattro comportamenti: gestione dello SmartPad, gestione dell'attrezzatura per la calibrazione, esecuzione in sicurezza dei movimenti intorno al robot, rispetto delle norme di sicurezza.

Inoltre l'esaminatore doveva assegnare un voto complessivo e poteva aggiungere eventuali commenti a corredo della propria valutazione.

## 5.1.7 Questionario post-esame

Si tratta di un questionario effettuato dagli utenti immediatamente dopo l'esame sul robot, prima di conoscere la valutazione effettuata dall'esaminatore. Le domande miravano a rilevare

- Autoconsapevolezza di apprendimento(self-efficacy):
- Autovalutazione:
- Soddisfazione

## Capitolo 6

## Risultati

In questo capitolo sono stati riportati ed analizzati i risultati delle valutazioni sperimentali, ovvero le risposte degli utenti ai questionari in appendice A, le prestazioni ottenute nella prova di calibrazione del robot reale, in termini di tempo impiegato ed errori commessi, e le valutazioni fornite dagli esaminatori sullo svolgimento della stessa con il supporto delle schede di valutazione in appendice B.

## 6.1 Metodologia di analisi

La maggior parte delle metriche utilizzate sono numeriche, dunque è stato possibile fare delle analisi statistiche su di esse.

Media e deviazione standard della maggior parte dei parametri sono riportati nei grafici a barre presenti nel capitolo, in cui i suddetti valori sono sempre differenziati per i due campioni STG e VRG, eccetto quelli relativi solo al solo campione VRG.

I parametri sono stati evidenziati con "\*\*" quando la differenza del valor medio tra STG e VRG ha una rilevanza statistica e dunque può essere presa in considerazione per trarre delle conclusioni. Per verificarne la rilevanza statistica, si è sottoposto tali parametri al T test, calcolando il p-value e considerando rilevanti quelli con p-value<0.05.

Si è scelto di evidenziare anche i parametri con p-value<0.1, con il simbolo "\*"

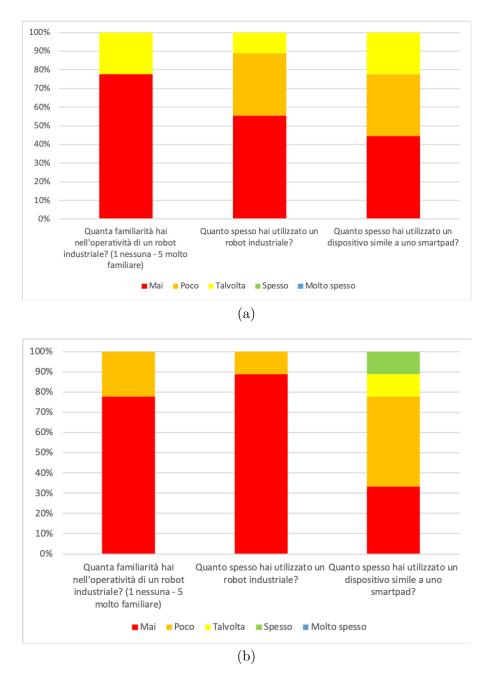


Figura 6.1: Competenze in ambito robotico per il gruppo STG (a) e VRG (b)

Sia nei questionari compilati dagli utenti che nelle schede di valutazione compilate dagli esaminatori erano presenti domande a risposta aperta. Queste

non sono interamente riportate, ma sono state prese in considerazione nella fase di discussione dei risultati.

## 6.2 Analisi pre-addestramento

Hanno partecipato volontariamente alla sperimentazione 18 persone, di età compresa tra 23 e 35 anni, 11.1% femmine, 88.9% maschi, di cui il 61% era costituito da studenti, dottorandi ed assegnisti di ricerca di Ingegneria Informatica, Ingegneria Meccatronica ed Ingegneria Elettrica del Politecnico di Torino.

### 6.2.1 Competenze in ambito robotico

I due gruppi sono risultati abbastanza omogenei in termini di familiarità con i robot, con lievi differenze tra gruppo STG e VRG in termini di esperienze pregresse.

Del campione VRG nessuno aveva seguito in precedenza un corso base sulla calibrazione di un robot industriale, mentre del campione STG una persona aveva già seguito in precedenza un corso base sulla calibrazione di un robot industriale prodotto da un'altra azienda.

Come mostrano i grafici in Figura 6.1a e 6.1b, circa l'80% degli utenti di entrambi i gruppi non aveva familiarità con l'operatività di un robot, il numero di persone che non avevano mai utilizzato in precedenza un robot era di 8 nel gruppo VRG e 5 nel gruppo STG.

## 6.3 Analisi post-addestramento

In questo paragrafo verranno illustrati in dettaglio e commentati i risultati dei questionari soggettivi e del NASA-TLX compilati dagli utenti dei due gruppi subito dopo aver effettuato l'addestramento.

Sono presentati e commentati anche i risultati dei quiz di teoria.

#### 6.3.1 NASA-TLX

Non è stata rilevata significatività statistica nella differenza tra le medie per la maggior parte dei punteggi ottenuti nel NASA-TLX, riportati in Figura

6.2.

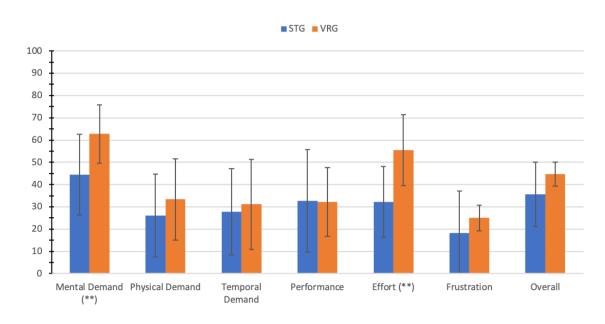


Figura 6.2: Punteggi NASA-TLX

Non è ancora stata concordata una "red-line", cioè una soglia oltre la quale il carico debba essere considerato eccessivo perché impattante negativamente sulle prestazioni[24], perché il rapporto tra carico cognitivo e prestazioni è complesso [27], ma è possibile confrontare i punteggi relativi al carico complessivo con quelli di riferimento riportati in [27].

Il punteggio relativo al carico complessivo percepito è stato di 35,63(SD 14.3) per gli utenti del STG e di 44,67(SD 5.4) per quelli del VRG, entrambi inferiori a 48.74 (SD 14.88), che è il valore medio ottenuto dagli studi considerati da [27] che hanno applicato la stessa modalità di calcolo del NASA-TLX utilizzata per questo lavoro.

Poiché il NASA-TLX può essere applicato per valutare attività molto diverse tra loro, in [27] sono stati suddivisi gli studi considerati in categorie determinate dalle tipologie di attività analizzate e sono state elaborate delle scale di riferimento per ogni categoria, consigliando di utilizzarle.

Si è scelto di estrarre due categorie, quelle più vicine alle esperienze didattiche: "Robot Operation" e "Video Game".

Rispetto ai valori di riferimenento, estratti dal lavoro in questione e mostrati in Figura 6.3, il punteggio medio ottenuto nell'addestramento tradizionale

Cumulative Frequency Distributions of NASA-TLX Global Workload Scores by Task Type

Task (n)	Min	25%	50%	75%	Max
Robot Operation (167)	9.59	41.00	56.00	63.00	80.00
Video Game (60)	14.08	48.23	56.50	63.72	78.00

Figura 6.3: Punteggi NASA-TLX di riferimento per le categorie "Robot Operation" e "Video Game"

si colloca al di sotto del venticinquesimo percentile rispetto alla categoria "Robot Operation", mentre quello del addeastramentoVR si colloca tra il venticinquesimo e il cinquantesimo percentile rispetto alla categoria "Robot Operation" e al di sotto del centicinquesimo percentile rispetto alla categoria "Video Game".

Le differenze significative tra i due gruppi sono state rilevate per le metriche *Effort* e *Mental demand*, maggiori per gli utenti del VRG in entrambi i casi.

## 6.3.2 Aspetti soggettivi

In questo caso gli utenti dovevano indicare con un punteggio da 1 a 5 il loro essere d'accordo o meno con una serie di affermazioni: completamente in disaccordo (1) – completamente d'accordo (5)

#### Attenzione

Era importante ottenere risultati positivi sull'autovalutazione dell'attenzione per entrambi i gruppi: se gli utenti di un gruppo avessero dichiarato di non essere riusciti a mantenere l'attenzione,i risultati dell'assessment sarebbero

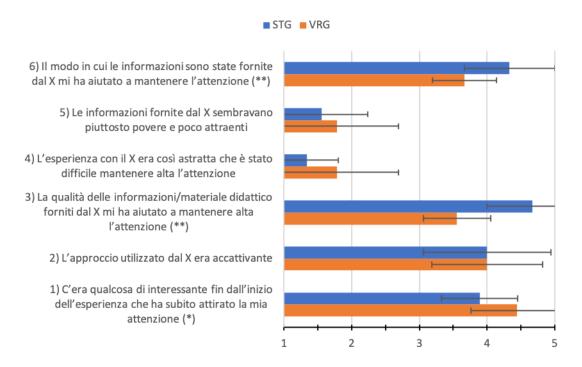


Figura 6.4: Attenzione, parte 1

stati probabilmente poco significativi.

Dai valori alti ottenuti per le domande 1, 2 e 7, riportate in Figura 6.4 e 6.5 si può evincere che gli studenti hanno mantenuto alta l'attenzione grazie all'approccio utilizzato dal corso/esperienza ed alla presenza di caratteristiche del corso/esperienza che hanno stimolato la loro curiosità.

I valori bassi ottenuti per la domanda 4 erano prevedibili per gli utenti STG perché nella maggior parte dei commenti pervenuti è statto riportato l'apprezzamento per l'alternanza tra spiegazioni frontali ed esercitazioni sul robot.

Il risultato è stato basso anche per il gruppo VR.

Dalle risposte alla domanda 5 si può dedurre che le informazioni fornite non sono risultate povere e poco attraenti, ma da quelle alle domande 3 e 6 si evince che quelli VR si sono sforzati di più per mantenere alta l'attenzione, essendosi anche annoiati per via della ripetizione (domanda 8) delle informazioni, che sono risultate meno varie (domanda 10), ma non noiose (domanda 11).

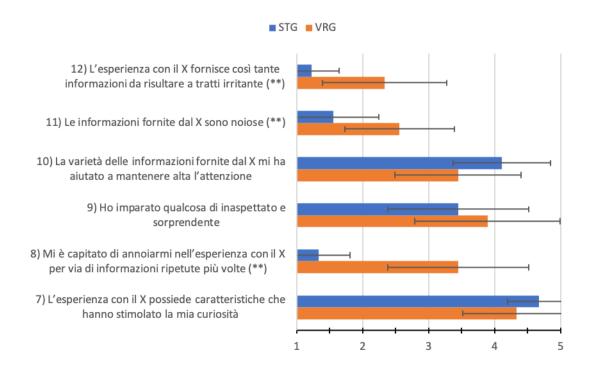


Figura 6.5: Attenzione, parte 2

Molti utenti del gruppo VRG hanno criticato la scarsa qualità della voce guida, in termini di realismo (monotonia della voce, assenza di intonazione, alcuni accenti errati, ecc.), oltre alla ripetitività: sebbene si sia lavorato molto sulla realizzazione di uno storytelling il più fluido possibile, ci sono ampi margini di miglioramento.

Invece, molti utenti del gruppo STG hanno espresso un notevole apprezzamento della capacità degli istruttori KUKA di comunicare e spiegare i concetti teorici ed illustrare le procedure sul robot. Questo può in parte spiegare i risultati ottenuti.

C'è da puntualizzare che questa discrepanza rientra comunque in una situazione di apprezzamento della qualità delle informazioni: le domande 11 e 12, in cui si chiede se si concordi sul fatto che le informazioni siano noiose e troppo numerose, hanno avuto un punteggio medio inferiore a 3 anche nel gruppo VRG.

#### Rilevanza

In Figura 6.6 sono mostrati i valori ottenuti per le domande che indagavano la rilevanza.

L'unico parametro in cui la differenza di valor medio tra i due gruppi è risultata statisticamente significativa è quello indagato dalla domanda 2, cioè la motivazione degli utenti: gli utenti del gruppo VRG erano più motivati rispetto a quelli del gruppo STG a completare la fase di training con successo.

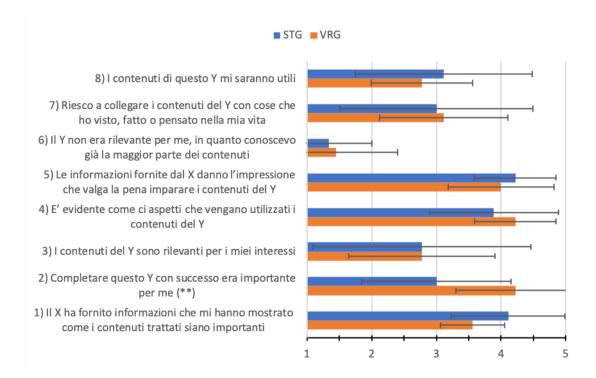


Figura 6.6: Rilevanza

Alcuni ritengono che la motivazione influenzi l'efficacia dell'apprendimento [8], dunque questo risultato potrebbe dare informazioni interessanti se se ne cercasse la correlazione con le prestazioni degli utenti.

Entrambe le esperienze didattiche, senza differenze statisticamente significative, hanno suscitato l'interesse per i contenuti affrontati (domanda 5), nonostante questi non fossero rilevanti per gli interessi di tutti gli utenti (domanda 3 con media inferiore a 3 e grande varianza, domanda 8 con media inferiore a 3 per il VRG e di circa 3 con grande varianza per lo STG).

I valori bassi per la domanda 6 sono in accordo con i dati rilevati nel preaddestramento, in cui gli utenti avevano auto-valutato le proprie competenze pregresse in ambito robotico e la maggior parte di essi avevano indicato di non averne.

#### Confidenza

Dal grafico in Figura 6.7 si può evince che le due tipologie di training non hanno messo in dfficoltà gli utenti(valori bassi per domande 2,4,6,8), risultando adeguati per il loro livello di conoscenze e competenze (domande 5, 9), in accordo con il livello basso di frustrazione rilevato dal NASA-TLX.

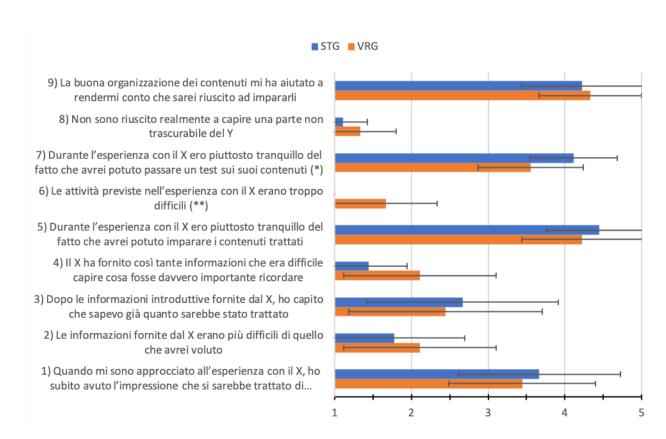


Figura 6.7: Confidenza

Le differenze statisticamente significative nelle risposte dei due gruppi alla domanda 6 indicano che, in un quadro in cui gli utenti non hanno ritenuto difficili le attività svolte nelle esperienze didattiche, quelli del VRG le hanno

ritenute più difficili rispetto agli utenti dello STG. Questo risultato è in accordo con quelli relativi a Mental Demand ed Effort del NASA-TLX e se ne può cercare una causa nel fatto che nel training VRG gli utenti hanno dovuto svolgere le operazioni utilizzando un'interfaccia con cui stavano ancora prendendo confidenza.

Gli utenti del VRG si sono, inoltre, sentiti meno fiduciosi di passare un test sui contenuti teorici del corso rispetto a quelli dello STG (domanda 7).

#### Soddisfazione

Non ci sono differenze significative nelle risposte alle domande, riportate in Figura 6.8, legate alla soddisfazione, ma, dati i punteggi alti ottenuti dalle domande 1, 4, 5 e 6, appare ragionevole assumere che entrambi i gruppi si siano sentiti soddisfatti dell'esperienza didattica (domande 5 e 6) ed appagati (domande 1 e 4).

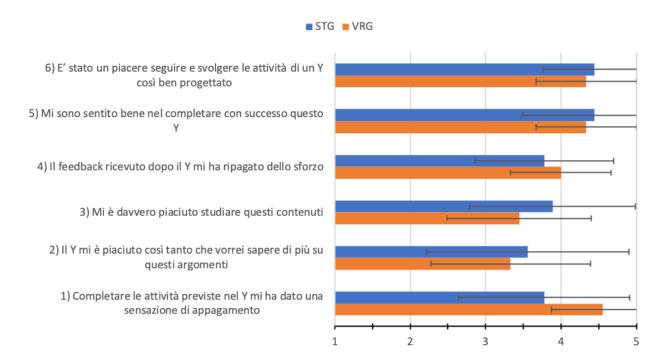


Figura 6.8: Soddisfazione

#### Aspettativa di apprendimento

Non vi sono differenze statisticamente rilevanti tra i due gruppi nei punteggi ottenuti nelle metriche legate all'aspettativa di apprendimento, mostrati in

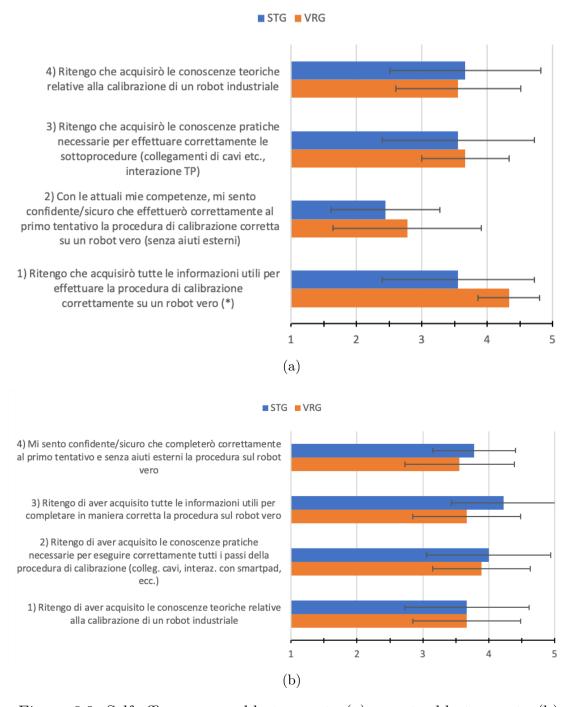


Figura 6.9: Self-efficacy, pre-addestramento (a) e post-addestramento (b)

Figura 6.13b, tuttavia, confrontando tali risultati con quelli ottenuti prima del training(Figura 6.13a), sempre relativi all'aspettativa di apprendimento, sembra ragionevole intravedere una differenza, tra i due gruppi, in termini di cambiamento avvenuto dopo l'addestramento nell'aspettativa di apprendimento: i valori dei parametri sono aumentati di più per gli utenti dello STG.

#### 6.3.3 Quiz conoscenze teoriche apprese

Nel grafico in Figura 6.10 è riportato il numero di risposte corrette ad ogni domanda del quiz per i due gruppi.

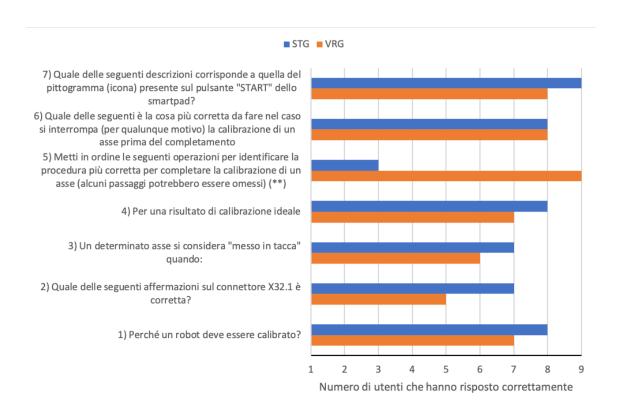


Figura 6.10: Numero risposte corrette per ogni domanda

Si vede chiaramente come tutti gli utenti del VRG ricordassero l'esatto ordine di operazioni da eseguire per la calibrazione di un asse, a fronte di 3 soli utenti dello STG.

Questo si può spiegare con il fatto che nel training virtuale bisognasse calibrare tutti gli assi e che quindi gli utenti abbiano avuto modo di memorizzare l'esatta sequenza di operazioni necessarie.

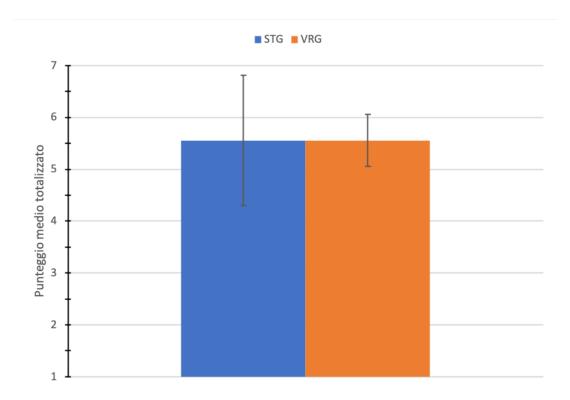


Figura 6.11: Punteggio medio totalizzato

Nelle altre domande il numero di risposte corrette è confrontabile, inoltre, dal grafico in Figura 6.11, che mostra le medie dei punteggi ottenuti dagli utenti dei due gruppi, si evince chiaramente che i risultati ottenuti nei quiz teorici dai due gruppi sono confrontabili. In particolare, a fronte della stessa media, i punteggi del gruppo VRG sono stati più uniformi (minore varianza).

Da utti questi dati e considerazioni è ragionevole dedurre che il trasferimento di conoscenze teoriche sia avvenuto nella VR in modo ugualmente se non maggiormente efficace rispetto al corso tradizionale.

#### 6.4 Fase di valutazione

In questa sezione sono riportati ed analizzati i valori ottenuti per i parametri oggettivi e soggettivi nella fase di valutazione degli utenti sull'esecuzione della procedura di calibrazione sul robot reale.

#### 6.4.1 Tempi di esecuzione

Tutti gli utenti di entrambi i gruppi sono riusciti a terminare la procedura di calibrazione sul robot reale.

Le prestazioni in termini di tempo impiegato, come mostrato in Figura 6.12, sono state migliori per gli utenti dello STG.

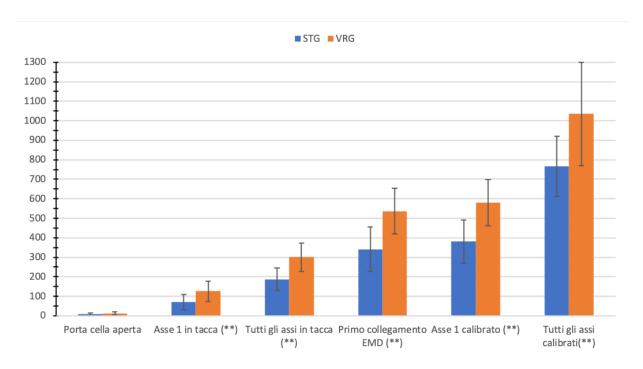


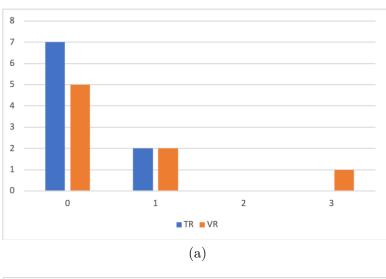
Figura 6.12: Tempi di esecuzione espressi in secondi

Ci si aspettava, in effetti, una differenza significativa di tempi di esecuzione, dovuta al fatto che il gruppo VRG non aveva confidenza con il robot reale (SmartPad, uomo morto, tacche meno visibili, connettori), mentre il gruppo

STG aveva già preso dimestichezza con il robot reale durante l'addestramento.

#### 6.4.2 Errori commessi

Come è ragionevole evincere dai grafici in Figura ?? e ??, gli utenti di entrambi i gruppi hanno commesso per la maggior parte zero errori o un errore, senza differenze significative tra un gruppo e l'altro.



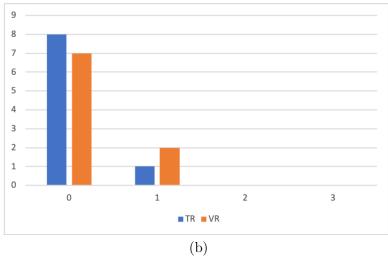


Figura 6.13: Errori commessi, gravi (a) e non gravi (b)

### 6.4.3 Valutazioni soggettive degli istruttori

Le valutazioni soggettive da parte degli istruttori, come mostra il grafico in Figura 6.14, sono state uniformi per gli utenti, con una significativa differenza sul punteggio legato alla gestione del TP: è stato più alto per gli utenti del VRG.

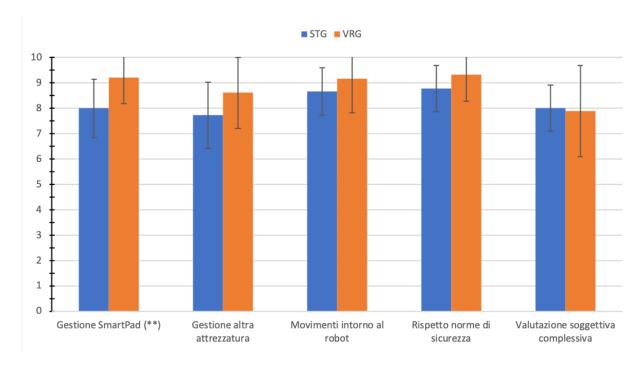


Figura 6.14: Valutazioni soggettive degli istruttori

Questo risultato, inaspettato ed interessante, è di grande importanza e degno di futuri approfondimenti, perché indica che le astrazioni e le metafore utilizzate nell'applicazione per simulare lo SmartPad e le interazioni con esso non sono risultate fuorvianti per gli utenti, che sono stati in grado di adattarsi velocemente all'utilizzo dello SmartPad reale.

Il fatto che il punteggio ottenuto sia addirittura superiore a quello ottenuto dagli utenti dell'altro gruppo si potrebbe spiegare in parte considerando che la gestione dello SmartPad comprende anche l'attenzione con cui lo si maneggia e dove e come lo si appoggia nel momento in cui bisogna utilizzare altri strumenti e che è plausibile pensare che gli utenti del VRG abbiano prestato più attenzione e cura rispetto agli utenti dell'altro gruppo nel maneggiare lo SmartPad perché più preoccupati, rispetto agli altri utenti, di danneggiarlo,

non avendolo mai utilizzato prima. Questa ipotesi si appoggia sulla tendenza, rilevata analizzando i risultati relativi alla consapevolezza di apprendimento, degli utenti del VRG ad essere meno confidenti degli altri di avere acquisito nell'eseprienza didattica le competenze necessarie ad affrontare la procedura.

Interessante anche il fatto che per le altre valutazioni non ci siano differenze statisticamente rilevanti, con però una tendenza del VRG ad ottenerle più alte, fatta eccezione per la valutazione complessiva.

Sarebbe interessante replicare la sessione di valutazione più volte per verificare se le differenze di tempo di completamento si assottiglino. Sarebbe anche interessante, alla luce di questi dati, in un altra edizione di valutazione, far compilare il questionario NASA-TLX non dopo l'addestramento ma dopo l'esame, per verificare se tra gli utenti dei gruppi vi siano delle differenze significative e verificare l'esistenza, sostenuta dall'autrice dello strumento [23], di correlazioni tra carico cognitivo sperimentato e prestazioni.

## 6.5 Analisi post-esame

In questa sezione sono riportati ed analizzati i risultati del questionario somministrato agli utenti immediatamente dopo la sessione di valutazione sul robot, prima che fosse loro rivelata la valutazione fatta dall'esaminatore.

## 6.5.1 Autovalutazione prestazioni

#### Autoconsapevolezza di Apprendimento

Dai dati riportati in Figura 6.15, è ragionevole dedurre che gli utenti di entrambe i gruppi, senza differenze statisticamente significative, ritenessero di aver ottenuto un buon punteggio (domanda 1) e che si siano sentiti sufficientemente sicuri nello svolgimento della procedura (domanda 4), sebbene non fossero certi di non aver commesso qualche imprecisione - errore non grave - (valore poco inferiore a 3 nella domanda 3).

Nonostante le differenze tra STG e VRG non siano significative, è interessante notare che gli utenti del primo gruppo abbiano teso a valutarsi più positivamente di quelli VRG, così come dopo l'addestramento erano più confidenti di concludere con successo la l'esame sul robot, mentre invece la loro prestazioni è stata valutata non più positivamente di quella degli utenti VRG.

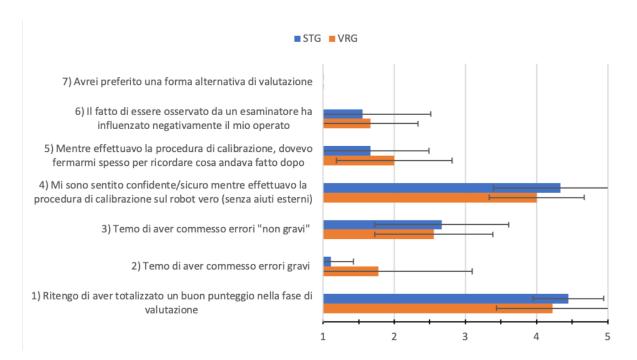


Figura 6.15: Autoconsapevolezza di apprendimento

#### Autovalutazione

Il grafico in Figura 6.16 mostra i valori ottenuti nelle autovalutazioni. Gli utenti non hanno in generale avuto difficoltà ad utilizzare lo smart pad (domanda 2), ma mentre quelli del gruppo VRG hanno tutti assegnato il valore minimo a questo parametro, alcuni del gruppo STG hanno segnato valori più alti. Sebbene non ci sia rilevanza statistica per questa differenza, si è ritenuto di doverla evidenziare perché è consistente con la differenza, statisticamente rilevante, ottenuta nelle valutazioni fatte dagli esaminatori sulla gestione dello SmartPad.

Dai valori alti riportati per le domande 1, 2, 3, 4 per entrambi i gruppi si evince che gli utenti non hanno riscontrato difficoltà nello svolgere le operazioni e questo è particolarmente rilevante per il VRG: alle domande 2 e 4, il cui scopo era quello di indagare se gli utenti fossero stati messi in difficoltà dalle discrepanze presenti tra oggetti e modi d'uso del mondo reale e la replica virtuale su cui si erano formati, gli utenti hanno assegnato valori alti, indicando di non aver avuto particolari difficoltà. Lavorare su un robot vero non ha generato senso di disagio o di ansia (domande 5 e 6).

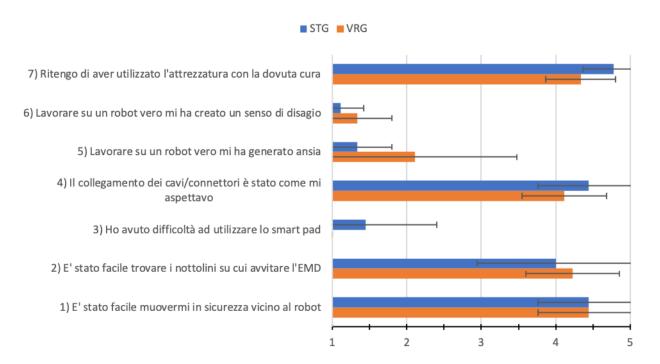


Figura 6.16: Autovalutazione

#### 6.5.2 Soddisfazione

Alla domanda "Complessivamente ritengo che l'esperienza didattica/il corso sia stata/o" gli utenti dovevano rispondere su una scala che andava da 1 - molto insoddisfacente – a 5 - molto soddisfacente - in riferimento all'esperienza di training svolta.

Le risposte, uniformi tra i due gruppi di utenti, indicano un livello di soddisfazione piuttosto alto: 4,56(0,50) per STG, 4,44(0,50) per VRG

## 6.6 Valutazione dell'esperienza in VR

In questa sezione sono riportati ed analizzati i risultati ottenuti nei questionari somministrati solo agli utenti del VRG, volti alla rilevazione di una serie di metriche soggettive.

### 6.6.1 Esperienze pregresse degli utenti

Come mostrato in Figura 6.17 il campione di utenti VRG era molto variegato per quanto concerne le esperienze pregresse con strumenti simili a quelli che avrebbero utilizzato nella fase di assessment.

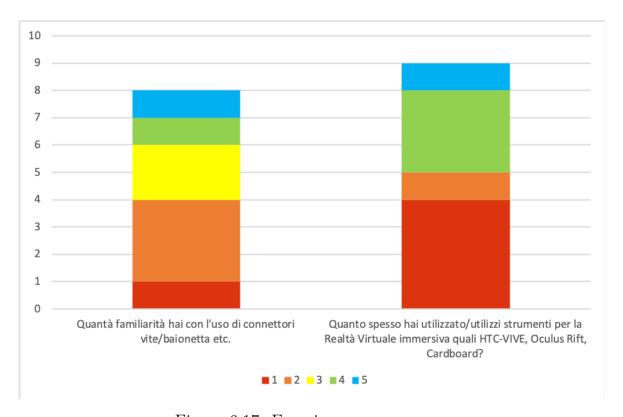


Figura 6.17: Esperienze pregresse

Per quanto riguarda le esperienze con tecnologie di VR immersiva, circa il 55% degli utenti non avevano mai o quasi mai usato tali tecnologie prima dei test e circa il 55% le utilizzano correntemente.

Un utente non ha risposto alla prima domanda, per questo nel grafico a barre risulta una persona in meno per quella domanda.

#### 6.6.2 SUS

In Figura 6.18 sono riportati i risultati del questionario SUS.

Dai valori ottenuti per le domande 1 e 8 si evince che gli utenti si sono sentiti a proprio agio nell'utilizzare il sistema sufficientemente da immaginare che, se

ne avesserlo la possibilità, lo utilizzerebbero frequentemente. Dai valori ottenuti per le domande è ragionevole concludere che gli utenti abbiano percepito il sistema come ben implementato, dal punto di vista delle funzionalità e del comportamento. Dai valori ottenuti per le domande 3, 4, 7, 10 è ragionevole dedurre che il sistema fosse sufficientemente intuitivo e facile da permettere agli utenti di imparare ad utilizzarlo senza il supporto di personale tecnico.

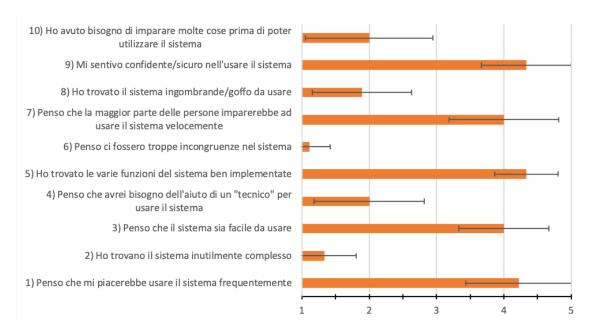


Figura 6.18: SUS

Il punteggio complessivo è risultato essere 81,39(7,28).

Un punteggio superiore a 68 è da considerare superiore alla media[28], tuttavia il modo migliore per interpretare tale risultato consiste nel confrontarlo con il riferimento elaborato dagli autori di [29] e riportato in Figura 6.19.

Il valor medio del punteggio ottenuto nei test si colloca nel quarto quartile(soglia: 80.3), che è traducibile nell'alta probabilità che gli utenti consiglino il prodotto ad un amico[30], il valore minimo ottenuto si colloca, invece, nel terzo quartile. Valor medio e valore minimo risultano entrambi oltre la soglia di accettabilità da parte degli utenti.

C'è da segnalare che i SUS più bassi sono emersi dagli utenti che stanno

attualmente sviluppando spplicazioni VRG, che corrispondono a quelli che hanno dichiarato di aver utilizzato/utilizzare spesso strumenti per la VR immersiva, mentre i più alti sono emersi dagli utenti privi di esperienza con tali strumenti. Le medie per le due categorie di persone sono state 84,50(4,85) e 77,50(7,91).

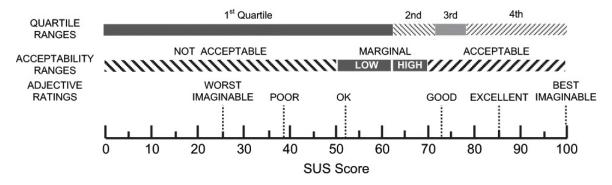


Figura 6.19: Percentili per l'interpretazione del punteggio complessivo del SUS

## 6.6.3 Usability

In Figura 6.20 sono riportati i risultati delle domande ulteriori sull'usabilità del sistema.

Dai valori ottenuti per le domande 1, 2, 3, 10 è ragionevole evincere che l'ambiente virtuale si comportasse in modo realistico secondo gli utenti. Dal valore elevato ottenuto per la domanda 4 si evince che gli utenti vedono

un reale beneficio in questo tipo di esperienza didattica.

I valori ottenuti per la domanda 5 indicano che gli utenti non hanno, i generale, avuto il dubbio/la sensazione che la operazioni effettuate nell'applicazione fossero una versione semplificata di quelle che avrebbero poi dovuto affrontare nella fase di valutazione. I valori ottenuti per la domanda 6 indicano che, in generale, il sistema abbia fornito agli utenti le informazioni essenziali per renderli in grado di svolgere le operazioni. Dai valori ottenuti per le domande 7 e 8 è ragionevole evincere che il sistema sia stato in grado di mettere gli

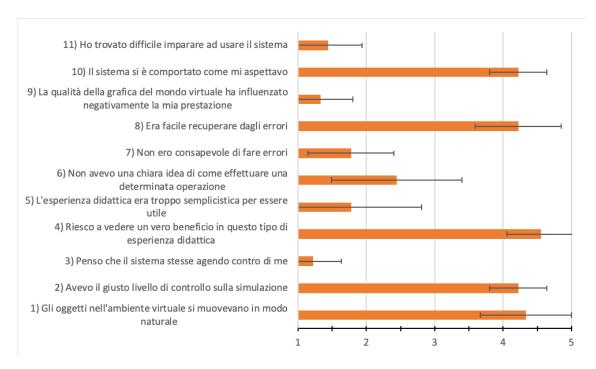


Figura 6.20: Usability

utenti in condizione di accorgersi di aver commesso degli errori e di trovare il modo di recuperare da essi. La qualità della grafica non ha influenzato negativamente le prestazioni degli utenti (domanda 9). Dai valori bassi ottenuti per la domanda 11 è ragionevole dedurre che le modalità di interazione scelte ed implementate siano risultate di facile apprendimento.

## 6.6.4 Immersione/presenza

In Figura 6.21 sono riportati i valori ottenuti per le domande che andavano ad indagare il senso di immersione/presenza.

Dai valori alti ottenuti per le domande 1, 3, 7 si evince che i livelli di immersione e presenza percepiti sono stati elevati e soddisfacenti per gli utenti.

I contenuti sonori sono stati apprezzati meno di quelli visivi in termini di effetto su immersione/presenza (domande 5 e 6) e questo è spiegabile alla luce della presenza di diversi commenti negativi sulla voce guidal legati principalmente a monotonia e difetti di pronuncia.

Le caratteristiche dello schermo non hanno, in generale, limitato il senso di

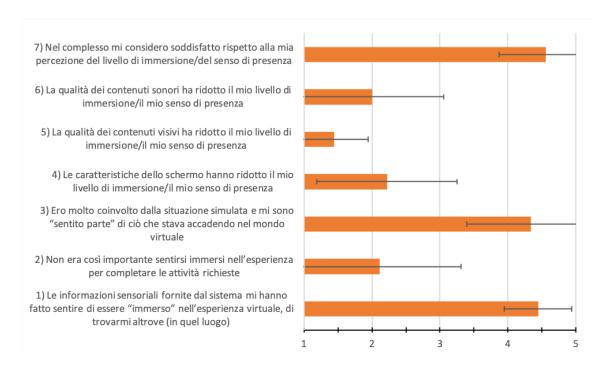


Figura 6.21: Immersione/presenza

presenza (domanda 4).

## 6.6.5 Information provisioning

Dai valori ottenuti per le domande che indagavano la qualità della trasmissione delle informazioni sono riportati in Figura 6.22 si può ragionevolmente dedurre che la trasmissione di informazioni sia stata ben progettata.

I valori bassi per la domanda 1 si evince che le informazioni mostrate non sono risultate di difficile comprensione. Dai valori per la domanda 2 si evince che le informazioni sono state in generale presentate in modo chiaro.

Dai valori per le domande 3 e 4 si evince che la voce guida ha comunicato efficacemente le informazioni, nonostante la ripetitività a volte riscontrata e la monotonia della voce.

Dai valori molto alti per le domande 5 e 6 si deduce che gli indicatori visivi sono stati efficaci ed hanno lavorato in sinergia con il voce guida senza distrarre l'utente.

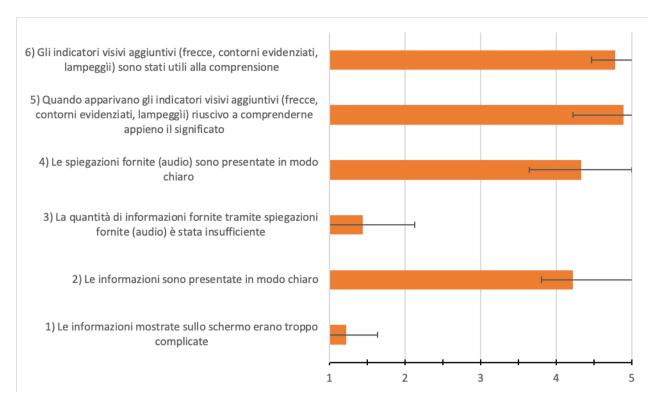


Figura 6.22: Information provisioning

#### 6.6.6 Fedeltà della simulazione

Su una scala che andava da 1 (molto insoddisfacente) a 5 (molto soddisfacente), la fedeltà della simulazione è stata valutata soddisfacente/molto soddisfacente, con valor medio 4,44(0,28).

Questo avvalora le discussioni precedenti sul realismo della simulazione.

#### 6.6.7 Permanenza nell'ambiente virtuale

La domanda "Avrei preferito passare più tempo nell'ambiente virtuale per prendere maggior dimestichezza con la procedura di calibrazione", le cui risposte possibili andavano da 1 (Completamente in disaccordo) a 5 (Completamente d'accordo), ha ottenuto un valor medio di 3,00(1,75).

Da questo si evince che in generale gli utenti al termine del training non sentissero particolarmente il bisogno di prendere ulteriore dimestichezza con la procedura di calibrazione.

Tuttavia molti utenti hanno riportato il desiderio di restare nell'ambiente virtuale per sperimentare con il sistema e metterlo alla prova.

## Capitolo 7

# Conclusioni e sviluppi futuri

#### 7.1 Conclusioni

Dai risultati ottenuti nelle valutazioni sperimentali, si può ragionevolmente concludere che il prototipo realizzato nel contesto di questa tesi abbia dimostrato che le applicazioni di VRI fruibili in auto-apprendimento possano effettivamente essere utilizzati in maniera efficace per l'addestramento di personale addetto ad operare con manipolatori robotici.

Dopo aver svolto l'addestramento virtuale in auto-apprendimento, tutti gli utenti sono stati in grado non solo di portare a termine la procedura di calibrazione sul robot reale senza riscontrare, in media, maggiori difficoltà rispetto agli utenti che avevano seguito l'addestramento tradizionale, ma anche di eseguirla, in media, con livelli di correttezza e precisione, riscontrati nelle valutazioni degli esaminatori, comparabili con quelli degli utenti addestrati in modo tradizionale.

A contribuire all'efficacia con con cui lo strumento realizzato è riuscito a far acquisire agli utenti le competenze necessarie per svolgere correttamente tutte le operazioni possono aver concorso diversi fattori rilevati nella fase di analisi delle valutazioni soggettive, sintetizzati di seguito.

• Le modalità di interazione scelte ed implementate, risultate intuitive e di facile apprendimento, hanno garantito che gli utenti si sentissero a proprio agio nell'utilizzare lo strumento ed hanno contribuito a mantenere il carico cognitivo sperimentato ad un livello accettabile, non generando negli utenti un senso di frustrazione.

- Il grado di realismo della simulazione, in termini sia di aspetto che di comportamento degli oggetti e dell'ambiente in generale, è stato sufficientemente alto tanto da far sperimentare agli utenti livelli di immersione e presenza elevati e soddisfacenti (dopo aver svolto la procedura sul robot fisico, gli utenti hanno reputato che la fedeltà della simulazione fosse elevata e soddisfacente). Ciò ha, inoltre, contribuito a non generare negli utenti la sensazione che le operazioni svolte nel mondo virtuale fossero una versione semplificata di quelle che avrebbero poi dovuto affrontare nella fase di valutazione sul robot reale, tanto che gli utenti, terminato l'addestramento, si sentivano, in media, sufficientemente preparati ad affrontare la calibrazione del robot reale con successo e hanno riportano di non aver provato una sensazione di disagio nell'avere a che fare con questo (oltre ad aver acquisito una consapevolezza di apprendimento analoga a quella acquisita dagli utenti addestrati in modo tradizionale).
- Le astrazioni e le metafore utilizzate nello strumento realizzato per simulare le interazioni complesse con gli oggetti (avvitare l'EMD, accoppiare i connettori, utilizzare lo SmartPad) non sono risultate fuorvianti per gli utenti, che sono successivamente stati in grado di adattarsi velocemente alla situazione reale, non riscontrando più difficoltà degli utenti addestrati in modo tradizionale, ad esempio, nel collegare i connettori o utilizzare lo SmartPad. Nella seconda attività, in particolare, hanno ricevuto dagli esaminatori un punteggio maggiore ed hanno riscontrato addirittura meno difficoltà rispetto agli utenti addestrati in modo tradizionale.
- L'addestramento virtuale è risultato sufficientemente coinvolgente da stimolare negli utenti interesse per i contenuti, il cui livello è risultato analogo a quello stimolato nell'addestramento tradizionale. Gli utenti sono inoltre risultati più motivati a completare con successo l'addestramento rispetto a quelli che hanno svolto l'addestramento tradizionale.
- L'esperienza didattica virtuale non è risultata meno soddisfacente ed appagante di quella sperimentata dagli utenti addestrati in modo tradizionale.

• Lo strumento realizzato ha fornito agli utenti le informazioni essenziali per renderli in grado di svolgere le operazioni richieste, concentrandosi su tutte in modo adeguato. Questo si può dedurre dall'aver rilevato che al termine dell'addestramento gli utenti non sentissero il bisogno di prendere ulteriore dimestichezza con la procedura di calibrazione. Inoltre, è risultato che lo strumento è stato in grado di mettere gli utenti in condizione di accorgersi di aver commesso degli errori e di trovare il modo di recuperare da essi.

Lo strumento realizzato ha anche dimostrato che le applicazioni di autoapprendimento in VR immersiva possono essere valide anche per l'apprendimento di informazioni teoriche, se il trasferimento delle informazioni viene ben progettato .

L'addestramento virtuale è, infatti, risultato efficace anche per l'acquisizione di conoscenze teoriche, come dimostrano i punteggi ottenuti dagli utenti, che sono risultati analoghi a quelli ottenuti dagli utenti addestrati in modo tradizionale.

A questo possono aver contribuito una serie di fattori rilevati nella fase di analisi delle valutazioni soggettive

- Le informazioni sono state presentate in modo chiaro, sia dalla voce guida che dallo schermo e non sono risultate di difficile comprensione, sebbene siano risultate a tratti noiose.
- Gli indicatori visivi sono stati efficaci ed hanno lavorato in sinergia con il voce guida senza distrarre l'utente.

Dalle risposte fornite dagli utenti al quiz sulle conoscenze teoriche è, inoltre, emerso che l'addestramento virtuale sia stato più efficace, rispetto a quello tradizionale, ai fini dell'acquisizione di quelle conoscenze teoriche che hanno bisogno di essere consolidate con la pratica, come dimostra il fatto che tutti gli utenti addestrati con l'applicazione abbiano risposto correttamente alla domanda che chiedeva di ordinare correttamente la sequenza di operazioni necessarie a calibrare un asse, diversamente da quanto accaduto per gli utenti addestrati in modo tradizionale, di cui solo in tre hanno risposto in modo corretto.

L'applicazione, infatti, prevedeva che gli utenti calibrassero tutti gli assi, dando loro il modo e il tempo di consolidare la conoscenza dell'ordine corretto di operazioni da eseguire.

La mancanza, nelle applicazioni VR, dei vincoli di tempo, logistici e strumentali, dati dall'usura della strumentazione, che caratterizzano i contesti di addestramento reali, le rende quindi adattabili alla diversità degli utenti che le utilizzano, in termini di tempo necessario per l'apprendimento, numero necessario di ripetizioni di un'azione da eseguire per poterla memorizzare ecc.

Gli utenti sono liberi di ripetere l'addestramento il numero di volte necessario per loro per sentirsi sicuri di affrontare la situazione reale correttamente.

Quanto all'attitudine degli utenti nei confronti dell'addeestramento virtuale sperimentato, i risultati delle valutazioni soggettive hanno riportato che

- Gli utenti vedono un reale beneficio in questo tipo di esperienza didattica
- Gli utenti si sono sentiti sufficientemente a proprio agio nell'utilizzare il sistema da immaginare che, se ne avessero la possibilità, lo utilizzerebbero frequentemente.
- Gli utenti consiglierebbero molto probabilmente l'utilizzo del prodotto ad un amico.

Gli utenti addestrati con l'applicazione hanno indiscutibilmente performato peggio rispetto agli utenti addestrati in modo tradizionale in termini di quantità di tempo impiegata per svolgere la calibrazione sul robot reale. Sarebbe interessante eseguire una validazione sperimentale che preveda almeno due sessioni di calibrazione del robot reale, a distanza di un certo tempo, per verificare se la differenza delle tempistiche di esecuzione si assottigli.

## 7.2 Sviluppi futuri

Dimostrare che le applicazioni di auto-apprendimento in VR immersiva possano diventare totalmente sostitutive, in un futuro più o meno prossimo, di una formazione sul campo tenuta da personale esperto non era l'obiettivo di questo lavoro.

I risultati della validazione sperimentale andrebbero interpretati nell'ottica di voler realizzare una innovazione delle metodologie di addestramento che risulti in una sinergia fruttuosa tra addestramento, teorico e sul campo, tenuto da personale esperto e auto-apprendimento.

Applicando questa visione all'identificazione di possibili scenario di evoluzione del prototipo realizzato, si possono immaginare una serie di sviluppi

- 1. Ampliando il numero di procedure effettuabili con l'applicazione, questo strumento potrebbe essere utilizzato per rendere una parte del corso di programmazione base effettuabile in auto-apprendimento ed immaginare di utilizzare lo strumento anche per eseguire un esame di pre-selezione degli utenti che possono accedere alla seconda parte del corso, erogata in modalità tradizionale.
  - Questo avrebbe molteplici vantaggi: la parte di corso effettuata nel KU-KA College potrebbe essere utilizzata per sfruttare al massimo il vantaggi dati dall'avere a disposizione i robot reali e la presenza di personale qualificato ed esperto, facendo effettuare dalla procedura virtuale la formazione sulle conoscenze teoriche, le operazioni di base e le nozioni di sicurezza; non accederebbero alla seconda parte del corso gli utenti che non sono pronti ad affrontarlo (eventualità che è stata riportata dagli istruttori); gli spazi del college sarebbero occupati per minor tempo, permettendo lo svolgimento di più attività e una maggior frequenza con cui i corsi possono essere svolti; la minor durata del corso sarebbe incentivante a svolgere il corso per gli operatori che avrebbero difficoltà a non poter essere presente sul luogo di lavoro per 5 giorni (durata del corso tradizionale).
- 2. Rendere l'applicazione in grado di interfacciarsi con gli strumenti di simulazione (ad esempio, KUKA.OfficeLite) per supportare le diverse modalità di ione e programmazione del robot e poterla utilizzare per verificare il comportamento del robot risultante prima di eseguire le procedure sul robot reale.
  - I vantaggi sarebbero: prevenire danni provocati al robot ed alla strumentazione dati da un uso scorretto, garantire l'incolumità degli operatori limitando il verificarsi di comportamenti scorretti.
- 3. Realizzare uno strumento che permetta agli operatori di sviluppare ed allenare capacità diagnostiche e di problem solving immergendoli in situazioni di guasti ed anomalie che sarebbe richioso riprodurre nella realtà in modo controllato, ma che potrebbero avvenire nel contesto d'uso reale.
  - Anche questo tipo di applicazione aumenterebbe la sicurezza degli operatori.

Le migliorie che, invece, nell'immediato potrebbero essere effettuate sul prototipo sono: lavorare per aggiungere suoni realistici; migliorare la voce guida cercando di limitare il senso di noia generabile negli utenti. Riguardo quest'ultimo aspetto, sarebbe interessante riflettere sull'aggiunta di intermezzi durantel'addestramento, consistenti in una sessione di test delle conoscenze teoriche. Questo permetterebbe di limitare la ripetizione degli stessi concetti nel corso della procedura se risulta che questi siano stati acquisiti. Questo va nella direzione di creare simulazioni più adattive alla specificità dell'utente.

# Appendice A

# Questionari utente

# A.1 Pre-training

## A.1.1 Dati demografici

- 1. Participant ID
- 2. Age
- 3. Gender
- 4. Ruolo/impiego
- 5. Training Style (TR/VR)

# A.1.2 Competenze in ambito robotico

- 1 (never), 2 (little), 3 (sometimes), 4 (often) 5 (very often)
  - 1. Quanta familiarità hai con l'uso di connettori (vite/baionetta/ etc.)
  - 2. Quanto spesso hai utilizzato/utilizzi strumenti per la Realtà Virtuale immersiva quali HTC-VIVE, Oculus Rift, Cardboard?
  - 3. Hai mai seguito un Y base di sulla calibrazione di un robot industriale? [si/no] (se si specificare)
  - 4. Quanta familiarità hai nell'operatività di un robot industriale? (1 nessuna 5 molto familiare)
  - 5. Quanto spesso hai utilizzato un robot industriale?
  - 6. Quanto spesso hai utilizzato un dispositivo simile a uno smartpad?

# A.1.3 Aspettativa di Apprendimento (Self-Efficacy)

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

- 1. Ritengo che acquisirò tutte le informazioni utili per effettuare la procedura di calibrazione correttamente su un robot vero
- 2. Con le attuali mie competenze, mi sento confidente/sicuro che effettuerò correttamente al primo tentativo la procedura di calibrazione corretta su un robot vero (senza aiuti esterni)
- 3. Ritengo che acquisirò le conoscenze pratiche necessarie per effettuare correttamente le sottoprocedure (collegamenti di cavi etc., interazione TP)
- 4. Ritengo che acquisirò le conoscenze teoriche relative alla calibrazione di un robot industriale

# A.2 Post-training

X = Sistema di Training VR / Docente, Y = Esperienza didattica / Corso

#### A.2.1 Attenzione

- 1. C'era qualcosa di interessante fin dall'inizio dell'esperienza che ha subito attirato la mia attenzione
- 2. L'approccio utilizzato dal X era accattivante
- 3. La qualità delle informazioni/materiale didattico forniti dal X mi ha aiutato a mantenere alta l'attenzione
- 4. L'esperienza con il X era così astratta che è stato difficile mantenere alta l'attenzione
- 5. Le informazioni fornite dal X sembravano piuttosto povere e poco attraenti
- 6. Il modo in cui le informazioni sono state fornite dal X mi ha aiutato a mantenere l'attenzione

- 7. L'esperienza con il X possiede caratteristiche che hanno stimolato la mia curiosità
- 8. Mi è capitato di annoiarmi nell'esperienza con il X per via di informazioni ripetute più volte
- 9. Ho imparato qualcosa di inaspettato e sorprendente
- 10. La varietà nel tipo di informazioni fornite dal X mi ha aiutato a mantenere alta l'attenzione
- 11. Le informazioni fornite dal X sono noiose
- 12. L'esperienza con il X fornisce così tante informazioni da risultare a tratti irritante

#### A.2.2 Rilevanza

- 1. Il X ha fornito informazioni che mi hanno mostrato come i contenuti trattati siano importanti
- 2. Completare questo Y con successo era importante per me
- 3. I contenuti del Y sono rilevanti per i miei interessi
- 4. E' evidente come ci si aspetti che vengano utilizzati i contenuti del Y
- 5. Le informazioni fornite dal X danno l'impressione che valga la pena imparare i contenuti del Y
- 6. Il Y non era rilevante per me, in quanto conoscevo già la maggior parte dei contenuti
- 7. Riesco a collegare i contenuti del Y con cose che ho visto, fatto o pensato nella mia vita
- 8. I contenuti di questo Y mi saranno utili

#### A.2.3 Confidenza

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

- 1. Quando mi sono approcciato all'esperienza con il X, ho subito avuto l'impressione che si sarebbe trattato di qualcosa di facile per me
- 2. Le informazioni fornite dal X erano più difficili di quello che avrei voluto
- 3. Dopo le informazioni introduttive fornite dal X, ho capito che sapevo già quanto sarebbe stato trattato
- 4. Il X ha fornito così tante informazioni che era difficile capire cosa fosse davvero importante ricordare
- 5. Durante l'esperienza con il X ero piuttosto tranquillo del fatto che avrei potuto imparare i contenuti trattati
- 6. Le attività previste nell'esperienza con il X erano troppo difficili
- 7. Durante l'esperienza con il X ero piuttosto tranquillo del fatto che avrei potuto passare un test sui suoi contenuti
- 8. Non sono riuscito realmente a capire una parte non trascurabile del Y
- 9. La buona organizzazione dei contenuti mi ha aiutato a rendermi conto che sarei riuscito ad impararli

#### A.2.4 Soddisfazione

- 1. Completare le attività previste nel Y mi ha dato una sensazione di appagamento
- 2. Il Y mi è piaciuto così tanto che vorrei sapere di più su questi argomenti
- 3. Mi è davvero piaciuto studiare questi contenuti
- 4. Il feedback ricevuto dopo il Y mi ha ripagato dello sforzo
- 5. Mi sono sentito bene nel completare con successo questo Y
- 6. E' stato un piacere seguire e svolgere le attività di un Y così ben progettato

### A.2.5 Aspettativa di apprendimento

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

- 1. Ritengo di aver acquisito le conoscenze teoriche relative alla calibrazione di un robot industriale
- 2. Ritengo di aver acquisito le conoscenze pratiche necessarie per eseguire correttamente tutti i passi della procedura di calibrazione (colleg. cavi, interaz. con smartpad, ecc.)
- 3. Ritengo di aver acquisito tutte le informazioni utili per completare in maniera corretta la procedura sul robot vero
- 4. Mi sento confidente/sicuro che completerò correttamente al primo tentativo e senza aiuti esterni la procedura sul robot vero

# A.3 Quiz di teoria

La risposta corretta per ogni domanda è stata qui indicata con (X)

#### 1. Perché un robot deve essere calibrato?

- 1. Per migliorare la ripetibilità del robot
- 2. Per permettere lo spostamento manuale specifico per asse
- 3. Per impostare la precisione assoluta del robot
- 4. Per impostare ogni asse del robot su un punto di riferimento fisso (X)

# 2. Quale delle seguenti affermazioni sul connettore X32.1 è corretta?

- 1. Va avvitato sull'apposita controparte posta alla base del robot
- 2. Va avvitato sull'apposita controparte della scatola di calibrazione asse
- 3. Va inserito, controllando il verso del pallino bianco, nell'apposita controparte alla base del robot
- 4. Va inserito, controllando il verso del pallino bianco, nell'apposita controparte sulla scatola di calibrazione (X)

#### 3. Un determinato asse si considera "messo in tacca" quando:

- 1. La cartuccia di calibrazione (nottolino) è allineata(o) con l'asse principale (longitudinale) del EMD
- 2. La tacca di riferimento sull'asse corrente è allineata/collima con quella sull'asse precedente (X)
- 3. La tacca di riferimento sull'asse corrente è allineata/collima con l'asse principale (longitudinale) del EMD
- 4. La cartuccia di calibrazione (nottolino) dell'asse da calibrare è allineato alla tacca di riferimento sull'asse precedente

#### 4. Per ottenere un risultato di calibrazione ideale

- 1. E necessario mettere in tacca tutti gli assi prima di procedere a calibrarli singolarmente (X)
- 2. Si può mettere in tacca un asse e calibrarlo senza che gli altri siano in tacca
- 3. Si può mettere in tacca un asse e calibrarlo senza che gli assi successivi siano in tacca
- 4. Si può mettere in tacca un asse e calibrarlo senza che gli assi successivi siano in tacca, a patto che i precedenti lo siano
- 5. Metti in ordine le seguenti operazioni per identificare la procedura più corretta per completare la calibrazione di un asse (alcuni passaggi potrebbero essere omessi)
- A) Tenere Premuto L'uomo morto fino al completamento
- B) Selezionare l'asse dall'apposito menù dello smartpad
- C) Controllare che entrambi i led siano verdi
- D) Tenere Premuto il pulsante START Fino al completamento
- E) Avviare la procedura selezionando il pulsante calibra sullo smartpad
- F) Tenere premuto il pulsante calibra sullo smartpad fino al completamento dell'operazione
  - 1. ABCED
  - 2. BCEAD (X)

- 3. BCAF
- 4. ABCF
- 6. Quale delle seguenti è la cosa più corretta da fare nel caso si interrompa (per qualunque motivo) la calibrazione di un asse prima del completamento
  - 1. Se la tacca dell'asse precedente si trova ancora prima dell'asse principale (longitudinale) del EMD, si può continuare come se l'asse fosse in tacca (X)
  - 2. E' necessario rimettere in tacca l'asse e ripetere la procedura solo su quell'asse specifico
  - 3. E' necessario ripetere l'intera procedura di calibrazione partendo dall'asse 1
  - 4. Nessuna delle precedenti
- 7. Quale delle seguenti descrizioni corrisponde a quella del pittogramma (icona/immagine/simbolo) presente sul pulsante "START" dello smartpad?
  - 1. Un triangolo di colore rosso
  - 2. Un quadrato di colore rosso
  - 3. Un triangolo di colore verde (X)
  - 4. Un quadrato di colore verde
  - 5. Un triangolo di colore nero
  - 6. Non è presente alcuna icona

# A.4 Questionario post-training per i soli utenti VRG

#### A.4.1 SUS

- 1. Penso che mi piacerebbe usare il sistema frequentemente
- 2. Ho trovano il sistema inutilmente complesso
- 3. Penso che il sistema sia facile da usare
- 4. Penso che avrei bisogno dell'aiuto di un "tecnico" per usare il sistema
- 5. Ho trovato le varie funzioni del sistema ben implementate
- 6. Penso ci fossero troppe incongruenze nel sistema
- 7. Penso che la maggior parte delle persone imparerebbe ad usare il sistema velocemente
- 8. Ho trovato il sistema ingombrande/goffo da usare
- 9. Mi sentivo confidente/sicuro nell'usare il sistema
- 10. Ho avuto bisogno di imparare molte cose prima di poter utilizzare il sistema

## A.4.2 Usability

- 1. Gli oggetti nell'ambiente virtuale si muovevano in modo naturale
- 2. Avevo il giusto livello di controllo sulla simulazione
- 3. Penso che il sistema stesse agendo contro di me
- 4. Riesco a vedere un vero beneficio in questo tipo di esperienza didattica
- 5. L'esperienza didattica era troppo semplicistica per essere utile
- 6. Non avevo una chiara idea di come effettuare una determinata operazione
- 7. Non ero consapevole di fare errori
- 8. Era facile recuperare dagli errori
- 9. La qualità della grafica del mondo virtuale ha influenzato negativamente la mia prestazione
- 10. Il sistema si è comportato come mi aspettavo
- 11. Ho trovato difficile imparare ad usare il sistema

### A.4.3 Immersione/Presenza

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

- 1. Le informazioni sensoriali fornite dal sistema mi hanno fatto sentire di essere "immerso" nell'esperienza virtuale, di trovarmi altrove (in quel luogo)
- 2. Non era così importante sentirsi immersi nell'esperienza per completare le attività richieste
- 3. Ero molto coinvolto dalla situazione simulata e mi sono "sentito parte" di ciò che stava accadendo nel mondo virtuale
- 4. Le caratteristiche dello schermo hanno ridotto il mio livello di immersione/il mio senso di presenza
- 5. La qualità dei contenuti visivi ha ridotto il mio livello di immersione/il mio senso di presenza
- 6. La qualità dei contenuti sonori ha ridotto il mio livello di immersione/il mio senso di presenza
- 7. Nel complesso mi considero soddisfatto rispetto alla mia percezione del livello di immersione/del senso di presenza

# A.4.4 Information Provisioning

- 1. Le informazioni mostrate sullo schermo erano troppo complicate
- 2. Le informazioni sono presentate in modo chiaro
- 3. La quantità di informazioni fornite tramite spiegazioni fornite (audio) è stata insufficiente
- 4. Le spiegazioni fornite (audio) sono presentate in modo chiaro
- 5. Quando apparivano gli indicatori visivi aggiuntivi (frecce, contorni evidenziati, lampeggìi) riuscivo a comprenderne appieno il significato
- 6. Gli indicatori visivi aggiuntivi (frecce, contorni evidenziati, lampeggìi) sono stati utili alla comprensione

# A.5 Post-esame

### A.5.1 Autoconsapevolezza di Apprendimento

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

- 1. Ritengo di aver totalizzato un buon punteggio nella fase di valutazione
- 2. Temo di aver commesso errori gravi
- 3. Temo di aver commesso errori "non gravi"
- 4. Mi sono sentito confidente/sicuro mentre effettuavo la procedura di calibrazione sul robot vero (senza aiuti esterni)
- 5. Mentre effettuavo la procedura di calibrazione, dovevo fermarmi spesso per
- 6. ricordare cosa andava fatto dopo
- 7. Il fatto di essere osservato da un esaminatore ha influenzato negativamente il mio operato
- 8. Avrei preferito una forma alternativa di valutazione (se sì, quale)

#### A.5.2 Varie

- 1. E' stato facile muovermi in sicurezza vicino al robot
- 2. E' stato facile trovare i nottolini su cui avvitare l'EMD
- 3. E' stato facile trovare le tacche di calibrazione
- 4. E' stato difficile mettere in tacca tutti gli assi
- 5. Ho avuto difficoltà ad utilizzare lo smart pad
- 6. E' stato difficile collegare i connettori senza rischiare di danneggiarli
- 7. Il collegamento dei cavi/connettori è stato come mi aspettavo
- 8. Lavorare su un robot vero mi ha generato ansia
- 9. Lavorare su un robot vero mi ha creato un senso di disagio
- 10. Ritengo di aver utilizzato l'attrezzatura con la dovuta cura

#### A.5.3 Satisfaction

molto insoddisfacente (1) – molto soddisfacente (5)

1. Complessivamente ritengo che Y sia stato/a

# A.6 Questionario post-esame per i soli utenti VRG

#### A.6.1 Satisfaction

molto insoddisfacente (1) – molto soddisfacente (5)

1. Complessivamente valuto la fedeltà della simulazione

#### A.6.2 Varie

Completamente in disaccordo (1) – Completamente d'accordo (5)

1. Avrei preferito passare più tempo nell'ambiente virtuale per prendere maggior dimestichezza con la procedura di calibrazione

# Appendice B

# Scheda di valutazione per gli esaminatori

## B.1 Info

- 1. Esaminatore
- 2. Participant ID

# B.2 Tempi di completamento

- 1. Apertura porta di sicurezza cella
- 2. Primo Asse in Tacca
- 3. Tutti gli assi in Tacca
- 4. Primo collegamento EMD completo e corretto (compresi collegamenti)
- 5. Primo Asse Aalibrato correttamente
- 6. Tutti gli Assi Calibrati correttamente

# **B.3** Valutazioni soggettive

- 1. N° Errori Gravi (specificare in Commenti quali)
- 2. N° Errorinon Gravi (specificare in Commenti quali)

- 3. Gestione SmartPad [1-10]
- 4. Gestione altra attrezzatura (cavi, EMD, trasformatore, ecc.) [1-10]
- 5. Gestione Movimenti intorno al Robot [1-10]
- 6. Rispetto norme di sicurezza [1-10]
- 7. Valutazione complessiva soggettiva [1-10]

### B.4 Elenco errori

#### Gravi

Svitato EMD senza prima aver rimosso il cavo Mosso l'asse senza aver svitato l'EMD Forzare l'inserimento dei cavi

#### Non gravi

Non avvitare a fondo l'EMD Lasciare il tasto di consenso prima di aver terminato la procedura Selezionare dall'elenco l'asse errato dopo aver inserito il calibratore su un altro asse

# B.5 Commenti Vari

# Bibliografia

- [1] Jaziar Radianti, Tim A. Majchrzak, Jennifer Fromm, and Isabell Wohlgenannt. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. Computers Education, 147:103778, 2020. ISSN 0360-1315. doi: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131519303276.
- [2] Steuer J. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. Journal of Communication, 4(24) (Autumn, 1992), pages 73-93. URL http://papers.cumincad.org/data/works/att/27eb.content.pdf.
- [3] Singer M.J. Witmer B.G. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7 (3) (1998), pages 225-240. URL http://nil.cs.uno.edu/publications/papers/witmer1998measuring.pdf.
- [4] Konradsen F. Jensen, L. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Educ Inf Technol 23*, page 1515–1529, 2018. doi: https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0.
- [5] Delaney B. Biocca F. Immersive virtual reality technology. Communication in the age of virtual reality, pages 57–124, 1995.
- [6] Rogers S. Virtual reality: The learning aid of the 21st century. Forbes (2019).
- [7] Ott M Freina L. A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. The international scientific conference elearning and software for education (Vol. 1), "Carol I" National Defence University (2015), page 133, 2015.
- [8] D. W. Carruth. Virtual reality for education and workforce training. 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and

- Applications (ICETA), Stary Smokovec, pages 1–6, 2017. doi: https://doi.org/10.1109/ICETA.2017.8102472.
- [9] Lee M.R. Lee, G.I. Can a virtual reality surgical simulation training provide a self-driven and mentor-free skills learning? investigation of the practical influence of the performance metrics from the virtual reality robotic surgery simulator on the skill learning and associated cognitive workloads. Surg Endosc 32, page 62–72, 2018. doi: https://doi.org/10.1007/s00464-017-5634-6.
- [10] A. Kulkarni N. Randeniya, S. Ranjha and G. Lu. Virtual reality based maintenance training effectiveness measures a novel approach for rail industry. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, BC, Canada, pages 1605–1610, 2019. doi: https://doi.org/10.1109/ISIE.2019.8781351.
- [11] Lorenzini C. Tecchia F. Carrozzino M. Bergamasco M. Avveduto G., Tanca C. Safety training using virtual reality: A comparative approach. International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics AVR 2017: Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, pages 148–163, 2017. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5\_11.
- [12] R. García R. Crespo and S. Quiroz. Virtual reality simulator for robotics learning. *International Conference on Interactive Collaborative and Blended Learning (ICBL), Mexico City, 2015*, pages 61–65, 2015. doi: https://doi.org/10.1109/ICBL.2015.7387635.
- [13] Cedergren J. E. Boletsis C. Vr locomotion in the new era of virtual reality: An empirical comparison of prevalent techniques. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2019, 2019. doi: https://doi.org/10.1155/2019/7420781.
- [14] D. Knapp D. Waller, E. Hunt. The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence*, 7 (2) (1998), pages 129–143. doi: https://doi.org/10.1162/105474698565631.
- [15] Anil Çamci. Exploring the effects of diegetic and non-diegetic audiovisual cues on decision-making in virtual reality. 16th Sound and Music Computing Conference (SMC 2019), 2019.

- [16] Vr@polito alla maker fair di roma. URL http://vr.polito.it/news/maker-faire-2019/.
- [17] Sito del software unity. URL https://unity.com/.
- [18] Sito del plug-in per unity steamvr. . URL https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/steamvr-plugin-32647.
- [19] Sezione dedicata a steamvr sul sito di steam. . URL https://store.steampowered.com/app/250820/SteamVR/.
- [20] Sito del plug-in obirope. URL https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-rope-55579.
- [21] Playmaker, plug-in per unity. URL https://assetstore.unity.com/packages/tools/visual-scripting/playmaker-368.
- [22] Sito ufficiale del nasa-tlx. . URL https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/.
- [23] L. E. Hart, S. G. Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. *P. A. Hancock and N. Meshkati (Eds.) Human Mental Workload. Amsterdam: North Holland Press (1988)*, 1988. URL https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/downloads/Hart Staveland ORIGINAL 1.pdf.
- [24] S. G. Hart. Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting, Santa Monica: HFES (2006), pages 904-908, 2006. URL https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/downloads/HFES\_2006\_Paper.pdf.
- [25] Implementazione html+javascript del questionario nasa-tlx. . URL https://www.keithv.com/software/nasatlx/.
- [26] J. Brooke. Sus: A "quick and dirty" usability scale. *Usability Evaluation* in *Industry.*, 1996.
- [27] Grier R. How high is high? a metanalysis of nasa tlx global workload scores. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 59, 10 2015. doi: 10.1177/1541931215591373.
- [28] Sito ufficiale usability.gov. URL https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html.

#### BIBLIOGRAFIA

- [29] Aaron Bangor, Phil Kortum, and James Miller. Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. *J. Usability Stud.*, 4:114–123, 04 2009.
- [30] Sito measuringu.com. URL https://measuringu.com/sus/.