POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione

Tesi di Laurea Magistrale

Tecnologie di Realtà Virtuale immersiva e di stampa additiva per esperienze museali

Relatori

Prof. Fabrizio Lamberti

Prof.ssa Roberta Spallone

Candidato

Simona PACCHIOTTI

Sessione di Luglio 2023

Sommario

L'avanzamento delle tecnologie in Realtà Virtuale o VR (dall'inglese Virtual Reality) ha aperto nuove prospettive nel settore museale e del patrimonio culturale, ambiti che sono costantemente alla ricerca di modalità innovative per raggiungere nuovi pubblici e arricchire l'esperienza di visita. Grazie al progressivo miglioramento delle qualità audiovisive e di interazione nei visori ed alla riduzione dei costi di produzione, la VR sta diventando sempre più accessibile e versatile.

Un'importante sfida per queste tecnologie è trovare paradigmi che consentano agli utenti di interagire in modo simile al mondo reale, portando la fisicità all'interno dell'esperienza. Di conseguenza, emerge la necessità di abbinare agli avanzamenti audiovisivi anche la capacità di fornire sensazioni tattili altrettanto realistiche per garantire un'interazione realistica e coinvolgente. Diversi studi hanno dimostrato che l'associazione di oggetti reali in ambienti virtuali, tramite tecniche aptiche passive, aumenti significativamente il realismo dell'esperienza e l'interesse dell'utente, conducendo ad una cosiddetta virtualità aumentata. Questo lavoro di tesi propone quindi la prototipazione di un'applicazione VR pensata per consentire interazioni con i reperti museali che prevedano anche una stimolazione tattile oltre a quella visiva ed auditiva. Il lavoro si basa sui risultati di una precedente tesi, frutto della collaborazione tra il Museo Egizio di Torino ed il Politecnico di Torino, mira ad ampliarne le potenzialità offrendo la possibilità di esplorare e interagire con i reperti in modo più tangibile e appagante.

Nel contesto di questa tesi, viene proposto un sistema che integra un'interfaccia virtuale interattiva guidata da un curatore virtuale con un'interazione fisica con i reperti museali. L'obiettivo è offrire agli utenti un'esperienza coinvolgente ed immersiva, consentendo loro di esplorare e interagire direttamente con una replica fisica del reperto, ottenuta tramite stampa additiva, mentre un curatore virtuale fornisce informazioni dettagliate e supporto.

Indossando il visore VR l'utente entra in una simulazione nella quale gli viene offerta la possibilità di approfondire la conoscenza di un reperto in prima persona. All'interno della simulazione, l'utente viene posto nella ricostruzione di un ambiente che ricorda uno spazio culturale, nella quale può interagire e manipolare una replica realistica e dettagliata di un reperto museale con le proprie mani, visualizzando

al contempo l'aspetto originale del manufatto attraverso il visore. Attraverso strumenti per il tracciamento del movimento, la replica fisica si sincronizza con la sua controparte virtuale, garantendo un'esperienza interattiva e realistica. Allo stesso tempo, il curatore virtuale, fornisce informazioni aggiuntive creando un'esperienza di apprendimento personalizzata e flessibile. La pipeline di sviluppo è stata infatti progettata per consentire un facile aggiornamento dei contenuti e delle informazioni al fine di garantire una continua evoluzione dell'applicazione. Attraverso questo sistema innovativo, si mira a migliorare l'accessibilità e l'interattività delle esperienze museali, offrendo un modo unico e coinvolgente per esplorare e imparare dal patrimonio culturale.

Indice

Elenco delle figure VII

1 Introduzione 1
- 1.1 Contesto . . . 1
- 1.2 VR per esperienze di visita immersive ed interattive . . . 1
- 1.3 Museo Egizio di Torino . . . 2
  - 1.3.1 Museo e tecnologia . . . 3
- 1.4 Interazione tra visitatori e reperti . . . 4
- 1.5 Interazione tangibile . . . 5
- 1.6 Virtuality continuum . . . 5
- 1.7 MR in campo museale ed espositivo. . . . 6
- 1.8 Il paradigma della vetrina . . . 7
- 1.9 Stampa additiva . . . 9
- 1.10 Il senso del tatto . . . 9
- 1.11 Senso del tatto il VR . . . 10
- 1.12 Avatar virtuali . . . 12
- 1.13 Organizzazione Contenuti . . . 13

2 Stato dell'arte 14
- 2.1 Smart replica . . . 14
  - 2.1.1 Virtex . . . 14
  - 2.1.2 Unlocking the story . . . 16
- 2.2 Stampa additiva e oggetti reali in VR . . . 16
  - 2.2.1 Physically touching virtual objects . . . 16
  - 2.2.2 Passive haptic feedback for object manipulation in VR . . . 17
  - 2.2.3 Augmented virtuality using touch-sensitive 3D-printed objects . . . 19
  - 2.2.4 VRtefacts . . . 20
  - 2.2.5 Associating real objects with virtual models for VR Interaction . . . 21
  - 2.2.6 VR Haptics at home . . . 22

2.2.7 Tangiball . . . 23
2.2.8 Using real objects for interaction in VR . . . 24
2.2.9 Escape room in MR: 10th Annual 3DUI Contest . . . 25
2.3 Avatar virtuali . . . 26
2.3.1 Hold the world . . . 26
2.3.2 Mingei Project . . . 27
2.3.3 Digital avatars as humanized museum guides . . . 28

3 Tecnologie 30
3.1 Software . . . 30
3.1.1 Unity . . . 30
3.1.2 Blender . . . 31
3.1.3 Fusion 360 . . . 32
3.1.4 Ultimaker Cura . . . 32
3.1.5 Salsa Lip Sync . . . 33
3.2 Hardware . . . 34
3.2.1 Meta Quest 2 . . . 34
3.2.2 Vive Tracker . . . 34
3.2.3 Ultimaker S5 . . . 35

4 Progettazione 37
4.1 Obiettivi, materiali e metodi . . . 37
4.1.1 Configurazione hardware . . . 39
4.2 Design document . . . 40
4.2.1 Ambiente . . . 41
4.2.2 Configurazione . . . 42
4.2.3 Reperto . . . 42
4.2.4 Interazione con la curatrice . . . 45

5 Realizzazione 48
5.1 Introduzione . . . 48
5.1.1 Sistema . . . 48
5.2 Stampa 3D e pipeline di produzione . . . 50
5.2.1 Progettazione . . . 50
5.2.2 Sistema di ancoraggio . . . 51
5.2.3 Stampa del reperto . . . 54
5.2.4 Calibratore . . . 60
5.3 Avatar virtuale . . . 61

6 Conclusioni 69

Bibliografia 71

Elenco delle figure

1.1 Logo Museo Egizio di Torino 2
1.2 Virtuality continuum 6

2.1 Virtex 15
2.2 UnlockingTheStory 16
2.3 Marker sugli oggetti fisici 18
2.4 Interazione con la stampa 20
2.5 Oggetti stampati montati sui tracker 21
2.6 Oggetti reali associati alle controparti virtuali 22
2.7 Nuvola di punti 22
2.8 VRHaptics At home 23
2.9 Tangiball 24
2.10 Oggetto stampato con marker 25
2.11 Hold the World 27
2.12 Avatar applicazione Mingei 28
2.13 Digital avatars as humanized museum guides 29

3.1 Interfaccia di Unity 31
3.2 Interfaccia di Unity 32
3.3 Salsa Lip Sync 33
3.4 Meta Quest 2 34
3.5 Vive Tracker 2018 35
3.6 Ultimaker S5 36

4.1 Mock Up Esperienza 37
4.2 Schema componenti principali applicazione 39
4.3 Ambiente 41
4.4 *mesh* ottenuta della Mummia di Gatto 43
4.5 Texture alternative 44
4.6 Interfacce 46
4.7 Struttura esperienza 47

5.1 Interazione in VR con la replica 49
5.2 Fasi stampa additiva 51
5.3 Sistema di ancoraggio Vive Tracker 52
5.4 Versione ridotta slitta 54
5.5 Slitta meccanismo ancoraggio 55
5.6 Tolleranze slitta/guida 56
5.7 Processo integrazione slitta nel modello 57
5.8 Interno modello 58
5.9 Twist and lock 59
5.10 Slicing modello da stampare 59
5.11 Modello del calibratore 60
5.12 Visemi 64
5.13 Modello curatrice virtuale 65
5.14 *rig* 66
5.15 Movimento occhi curatrice virtuale 68

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto

Il progetto di tesi nasce dalla collaborazione tra il Museo Egizio di Torino e il Politecnico di Torino, con l'obiettivo di ampliare un lavoro di tesi precedente e svilupparne ulteriormente le potenzialità. La tesi si colloca in un ambito più vasto di ricerca e innovazione che ha l'obiettivo di sviluppare un dialogo fra tecnologia e patrimonio culturale per costruire una nuova modalità di fruizione culturale di contenuti museali.

L'obiettivo principale consiste nell'aumentare la tangibilità delle esperienze museali attraverso lo sviluppo di un nuovo tipo di interazione più immersiva, al fine di promuovere l'apprendimento attivo. A tal fine, si propone lo sviluppo di un'applicazione in Realtà Virtuale (o *Virtual Reality*, VR), in cui l'utente potrà interagire direttamente con repliche dettagliate di reperti museali, realizzate tramite la tecnologia di stampa additiva, guidati da un curatore virtuale che fornirà informazioni e approfondimenti sui reperti stessi. La pipeline di sviluppo sarà progettata in modo agile e flessibile, permettendo un agevole aggiornamento dei contenuti e delle informazioni.

1.2 VR per esperienze di visita immersive ed interattive

Il lavoro di tesi originale [1] prevede un'esperienza in VR nel quale viene data al visitatore la possibilità di interagire in prima persona con i reperti museali.

È stata creata una pipeline di produzione di applicazioni VR per realizzare un'esplorazione interattiva del patrimonio culturale, che offre possibilità versatili di impieghi in ambito museale.

Il visitatore viene inserito nella ricostruzione di un ambiente che ricorda uno spazio culturale e tramite l'uso di un visore VR ed i rispettivi controller può interagire ed osservare personalmente gli oggetti presenti su un tavolo mentre un curatore virtuale lo guida nel percorso di apprendimento.

I reperti utilizzati sono stati scelti tra quelli della mostra Archeologia Invisibile [2], ottenuti tramite scansioni 3D su cui sono state applicate le necessarie texture.

La replica verosimile della guida virtuale è stata creata tramite scansioni fotogrammetriche ad alta definizione di un curatore del Museo Egizio unito alla tecnologia MetaHuman di Unreal Engine 3D. Le animazioni sono state registrate tramite l'uso della *motion capture* e poi sono state sincronizzate con gli audio precedentemente registrati in laboratorio.

L'utente può scegliere su quale dei reperti concentrarsi avvicinando il controller e la guida inizierà la sequenza di dialoghi preregistrati di approfondimento di conseguenza. Il curatore guida l'utente nell'esperienza spiegando come utilizzare i controller per interagire e scoprire i reperti, dando la possibilità al visitatore di prendere l'oggetto, ruotarlo, scalarlo e osservare texture alternative sugli oggetti.

1.3 Museo Egizio di Torino

Il Museo Egizio di Torino è il più antico museo al mondo dedicato esclusivamente alla civiltà egizia, secondo solo per valore e reperti al museo del Cairo. La sua storia risale al 1824, quando il re Carlo Felice di Savoia decise di aprire al pubblico una collezione privata di antichità egizie. La prima collezione di reperti che sarebbe

Figura 1.1: Logo Museo Egizio di Torino

poi diventata il Museo Egizio di Torino ebbe origine con l'acquisizione da parte di Carlo Emanuele I di Savoia della Mensa Isiaca, una tavoletta di bronzo giunta a Torino intorno al 1626 e considerata il nucleo originario della collezione. La Mensa suscitò talmente interesse che tra il 1700 e il 1800 fu organizzata una spedizione in Egitto per approfondirne lo studio.

In seguito, l'interesse per la cultura egizia continuò a crescere, in particolare dopo le campagne napoleoniche in Egitto del 1800 per via delle quali scoppiò una

vera e propria "moda" in Europa per il collezionismo delle antichità egizie. Nel 1824 il re Carlo Felice di Savoia fondò il Museo delle Antichità Egizie di Torino, presso il Palazzo dell'Accademia delle Scienze, l'attuale sede del museo, unendo i reperti di antichità classiche di Casa Savoia, tra cui la collezione Donati, e la collezione di Bernardino Drovetti, console di Francia durante l'occupazione in Egitto, acquistata lo stesso anno.

Nel corso dei decenni successivi, la collezione ha continuato a crescere grazie ad acquisti, donazioni e scavi archeologici in Egitto. Secondo il catalogo pubblicato nel 1888, al tempo il museo contava una collezione complessiva di 7400 pezzi. Tra il 1903 e il 1937 Ernesto Schiapparelli e Giulio Farina condussero degli scavi archeologici in Egitto che portarono a Torino circa 30000 reperti, che indusse il museo a risistemare e ristrutturare le sale per fare spazio alle nuove collezioni.

Nel corso del '900 il museo subì importanti ristrutturazioni e ampliamenti, che permisero di esporre i reperti in maniera più adeguata e di arricchire l'offerta didattica e culturale. In particolare, nel 1970 fu inaugurata la ricomposizione del tempietto rupestre di Ellesya, offerto dal Governo egiziano come segno di riconoscimento per l'aiuto offerto dall'Italia nel salvataggio dei templi nubiani minacciati dall'innalzamento delle acque della diga di Assuan.

Nel 2015 il museo è stato ampliato e ristrutturato ed oggi, con più di 40000 pezzi organizzati su 12000 metri quadri distribuiti su cinque piani espositivi, è uno dei principali centri di ricerca e divulgazione della cultura egizia, nonché una meta ambita per i turisti e gli appassionati di archeologia e storia antica.

1.3.1 Museo e tecnologia

Il Museo ha sempre mostrato interesse nello sperimentare nuove tecnologie, ha sviluppato infatti diversi progetti in questo campo. Sul sito sono per esempio disponibili tour virtuali del museo e della mostra Archeologia Invisibile, sviluppati dal Politecnico di Torino in collaborazione con lo studio creativo Robin Studio.

Il Museo Egizio si colloca infatti in un ambiente dinamico di ricerca e innovazione che da anni si impegna a sperimentare nuove tecnologie, cercando di creare un dialogo tra tecnologia e patrimonio culturale per realizzare nuove modalità di fruizione che permettano di suscitare l'interesse e fare in modo che i musei vengano frequentati e percepiti come luoghi di accrescimento culturale.

Nel 2019 viene anche presentata una mostra temporanea con il titolo "Archeologia Invisibile" [2] che evidenzia l'importanza dell'uso della tecnologia in ambito archeologico e di allestimento museale. Si tratta di un allestimento che mostra come sia possibile ricomporre le informazioni e interrogare gli oggetti tramite l'archeometria, ovvero l'uso di tecniche non intrusive per studiare i materiali, i metodi di produzione e la storia conservativa dei reperti. Tramite queste tecniche è possibile andare oltre alle informazioni di base di un oggetto e raccontarne l'intera

storia, rendendo visibile ciò che è invisibile. È stato possibile, ad esempio, sbendare virtualmente le mummie della collezione, permettendo di visualizzarne i resti celati dalle bende, senza danneggiare i reperti originali.

Il successo dell'esperienza dimostra che un'esposizione di argomento archeologico ha tutte le potenzialità di diventare un'esperienza coinvolgente in cui il visitatore può partecipare in prima persona, il tutto grazie anche ad installazioni multimediali e spazi di interazione digitale per creare con il pubblico un dialogo diretto, immersivo, coinvolgente e inedito. Il Museo Egizio si propone come una istituzione all'avanguardia, e secondo Christian Greco, direttore dal 2014, l'innovazione digitale deve essere la colonna portante dei musei: per tramandare l'importanza del patrimonio culturale alle generazioni future è necessario renderla accessibile con nuove tecniche che rivoluzionino il modo di vivere l'arte.

Da anni vengono portati avanti progetti di inclusione sociale per rendere accessibile i contenuti della collezione anche a coloro che non possono visitarlo, permettendo così al museo di uscire dai suoi confini geografici.

Il museo non deve essere un luogo che si limita ad esporre il suo patrimonio, ma una struttura mobile e dinamica per un coinvolgimento più attivo del pubblico, per trasformarlo da un magazzino di opere ad un luogo di dialogo culturale.

1.4 Interazione tra visitatori e reperti

Una visita tradizionale in un museo prevede un percorso guidato che il visitatore può seguire per osservare gli elementi di interesse esposti. L'esperienza di visita può essere supportata da didascalie e pannelli espositivi posti vicino agli oggetti esposti per approfondirne la conoscenza, oppure da una guida che accompagna il visitatore lungo il percorso, fornendo informazioni e rispondendo alle domande. Alcuni musei forniscono anche guide preregistrate che possono essere fruite tramite dispositivi messi a disposizione dal museo stesso oppure da dispositivi privati del visitatore, come il servizio fornito dal Museo Egizio. [1]

Un possibile limite nell'esperienza museale è però rappresentato dal necessario distacco tra i visitatori e gli oggetti esposti. Questo è causato dall'impossibilità di toccarli con mano, dal momento che, per loro stessa natura, solo fragili e vanno salvaguardati. Vengono infatti spesso conservati in teche che limitano anche la possibilità di osservarli nella loro interezza.

Con l'avvento dei media digitali, e quindi con l'interattività e la multimedialità che questi comportano, i metodi tradizionali per comunicare le informazioni sugli oggetti non sono più gli unici strumenti che possono essere utilizzati dai visitatori nei musei o nei siti di patrimonio culturale.

A partire dalla metà degli anni '80 si è iniziato ad adottare vari tipi di tecnologie per sperimentare nuovi metodi di fruizione dei contenuti, rendendo quindi i musei

un importante campo di studi per la *Human Computer Interaction* (HCI) e per il design dell'interazione. Fra vari tipi di interazione alternativa, l'interazione tangibile mira a creare e tecnologie che integrano le funzionalità digitali attraverso l'uso di oggetti fisici, gesti e movimenti corporei.

1.5 Interazione tangibile

L'interazione tangibile viene ormai considerata un campo di ricerca piuttosto consolidato all'interno dell'HCI e del design di interazione. Fa parte di una tendenza diventata prominente a metà degli anni '90 che mira a superare i limiti dello stile di interazione *Windows, Icons, Menus, Pointer* (WIPM) cioè quella tipica dei computer desktop e della VR, che oltre a rendere l'interazione meno spontanea e naturale, rischiano di allontanare le persone dal mondo reale e dai contenuti delle esposizioni[3].

In quel periodo è emersa una forte convinzione che, anziché costringere gli utenti a entrare in un mondo virtuale, si dovesse arricchire il mondo reale con funzionalità digitali, così da mantenere la ricchezza dell'interazione fisica e consentendo una transizione fluida tra il digitale e il reale.

L'interazione tangibile si è inserita in diversi campi, tra cui arte, design, scienza, educazione, medicina e patrimonio culturale. In particolare, dagli inizi degli anni 2000 ha iniziato ad essere usata sempre di più nel campo del patrimonio culturale e museale per creare esperienze di visita più coinvolgenti ed emozionanti, utilizzando installazioni interattive che integrino meglio le tecnologie digitali e contenuti multimediali con la materialità degli oggetti e la fisicità dell'esperienza. In questo modo è possibile consentire ai visitatori di interagire con i reperti e le opere esposte in modo più diretto, intimo e coinvolgente.

L'interazione tangibile comprende varie tecnologie che considerano l'utilizzo di oggetti fisici come interfaccia, come ad esempio tavoli interattivi, smart object, luoghi fisici interattivi e tutti quei sistemi che permettono all'utente di interagire con i dati digitali in modo più naturale ed intuitivo, consentendo di creare un ponte tra il mondo digitale e quello fisico.

Le tecnologie di questo tipo sono chiamate generalmente Realtà Mista (MR dall'inglese *Mixed Reality*

1.6 Virtuality continuum

In questa tesi si affronta il tema di aumentare un'esperienza in VR attraverso l'integrazione di oggetti reali. Al fine di contestualizzare il progetto all'interno delle esperienze immersive, verrà pertanto fornita una breve panoramica del concetto di *virtuality continuum.*

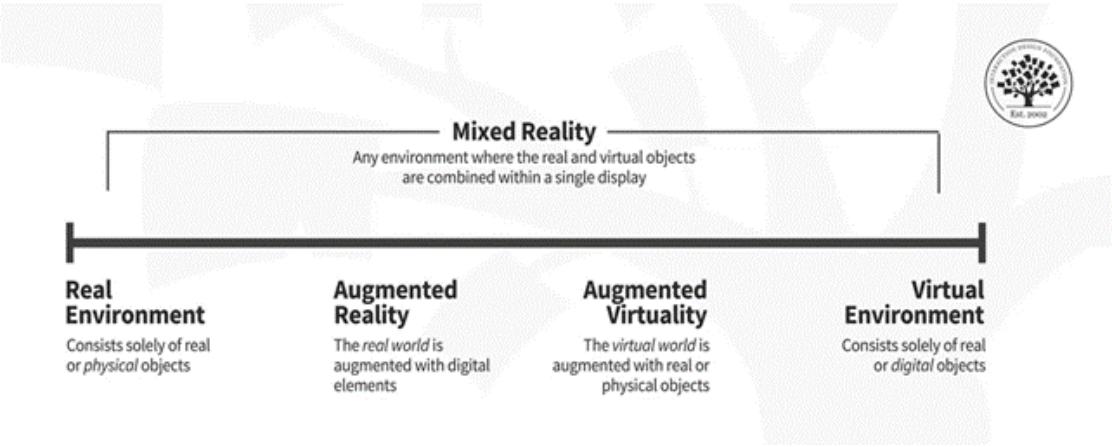

Figura 1.2: Virtuality continuum

Si tratta di una teoria proposta da Paul Milgram e Fumio Kishino nel 1994 [4], che descrive l'interazione tra il mondo reale e il mondo virtuale presentando una scala graduale di esperienze immersive, in cui gli ambienti e gli oggetti virtuali si combinano con elementi reali. Alle estremità di questa scala vengono messe la realtà fisica, in cui gli oggetti e gli ambienti sono completamente reali e non vi è alcuna componente virtuale aggiunta, e la VR, un'esperienza completamente immersiva in cui l'utente è completamente trasportato in un ambiente virtuale. Tutto ciò che è compreso tra le due estremità viene definito Realtà Mista, in cui gli oggetti reali vengono arricchiti da elementi virtuali, come informazioni sovrapposte o oggetti virtuali inseriti nello spazio reale.

In particolare, la Realtà Aumentata (o *Augmented Reality*, AR) si riferisce a quei sistemi che inseriscono elementi virtuali in un contesto reale, mentre la Virtualità Aumentata comprende tutti quei sistemi che inseriscono oggetti reali all'interno di ambienti virtuali.

Si può considerare che questa tesi si collochi all'interno del concetto di Virtualità Aumentata, in cui gli oggetti reali vengono integrati in modo sinergico con gli elementi virtuali, consentendo all'utente di interagire in modo più tangibile e coinvolgente con il mondo virtuale.

1.7 MR in campo museale ed espositivo.

Uno dei motivi principali dell'interesse per l'utilizzo di questo tipo di tecnologie in campo museale, oltre alla possibilità di modernizzare il modo di fruire i contenuti, è il fatto che aiuta a risolvere uno dei principali motivi di scetticismo nell'utilizzo di metodi tecnologici in campo museale, ovvero il rischio di distrarre i visitatori dagli

oggetti reali e dalla loro materialità, che invece dovrebbero essere i veri protagonisti del museo.

La AR ha iniziato quindi ad essere utilizzata in installazioni museali per la sua capacità intrinseca di sovrapporre le informazioni digitali direttamente sugli oggetti in mostra, in modo da permettere al visitatore di approfondire la conoscenza dell'oggetto senza distrarlo dal focus principale della visita.

In modo simile, i sistemi di virtualità aumentata sono stati sviluppati per aumentare gli ambienti virtuali con una rappresentazione di oggetti reali.

Parallelamente ad un crescente interesse per la materialità dell'esperienza di visita mostrato negli studi sui musei, anche i sistemi di interazione tangibili sono stati applicati nei musei e nelle mostre nelle loro diverse forme. Anche se diversi nella forma, tutti questi sistemi richiedono stili di interazione simili: attraverso la manipolazione di oggetti tangibili specifici (interazione basata sugli oggetti) o attraverso gesti liberi (interazione basata sui gesti).

1.8 Il paradigma della vetrina

Tradizionalmente l'idea dell'utilizzo del tatto non viene associata alle tipiche visite museali. Anzi, studi recenti suggeriscono che il tocco e la manipolazione di oggetti in siti del patrimonio culturale, in musei e gallerie d'arte sia associato alla segnaletica proibitiva presente quasi sempre che intima ai visitatori di non toccare. I visitatori nei musei occidentali sono abituati a credere che sia vietato toccare gli oggetti esposti a meno che non venga esplicitamente specificato il contrario, ed il paradigma della "vetrina" domina la pratica museale odierna. In altre parole, la maggior parte dei musei moderni si è concentrata sulla fruizione visiva delle collezioni, rendendola un'esperienza unisensoriale, trascurando la possibilità di coinvolgere altri sensi come il tatto, consentendo solo di osservare da distanza e spesso attraverso una teca [5].

La ragione per questa tendenza è indubbiamente giustificata, dal momento che i contenuti delle esposizioni e dei siti culturali sono preziosi e fragili, vanno trattati con le necessarie cure e precauzioni: solo il personale esperto e altamente qualificato può trattare oggetti così delicati nel modo corretto e assicurarsi che vengano preservati nelle condizioni migliori possibili per le generazioni future.

Tuttavia, i risultati ottenuti da ricerche recenti suggeriscono che esperienze tattili nei musei affascinino ed entusiasmino i visitatori: dare la possibilità di toccare gli oggetti nei musei e nei siti culturali consente di comprendere/esplorare il mondo che ci circonda in modo innovativo e dinamico, permettendo ai visitatori di creare un legame più profondo con gli oggetti e di assimilare le informazioni in modo più completo.

Per un lungo periodo di tempo la situazione è rimasta piuttosto invariata. Negli ultimi due decenni, tuttavia, si è osservato però un certo interesse a modificare il paradigma. L'interazione diretta con gli oggetti museali sembra promuovere esperienze stimolanti e memorabili che si combinano bene con il paradigma educativo costruttivista predominante nel museo postmoderno.

Per questo motivo, alcuni musei hanno iniziato a sperimentare con esperienze multisensoriali come visite tattili e mostre e sessioni di maneggiamento; un esempio di questo tipo di iniziativa è il progetto "Hands on Desk" del British Museum, che a partire dal 2000 offre la possibilità ai visitatori di toccare con mano alcuni reperti selezionati della collezione. Il progetto è stato accolto con interesse da buona parte dei visitatori che asseriscono che un'interazione di questo tipo "migliora la qualità della loro visita". Anche se poco frequenti, le recensioni e le valutazioni effettuate mostrano che queste attività siano estremamente utili ed efficaci [6].

Nonostante l'interazione multisensoriale sia stata adottata pienamente dai centri scientifici e dai musei per bambini, per i musei più tradizionali essa costituisce ancora un ostacolo, in quanto rappresenta un rischio per gli oggetti di valore che essi hanno il compito di proteggere [7].

Questa scelta è ovviamente giustificata, in quanto la preservazione di questi oggetti dalla degradazione è di fondamentale importanza ed il rischio, anche con la supervisione esperta dei curatori, è comunque piuttosto significativo. Se gli oggetti sono particolarmente fragili la questione è anche più pressante, perché qualunque manipolazione o esposizione non perfettamente eseguita nelle condizioni necessarie potrebbe causare danni estensivi e duraturi.

La domanda quindi è come si possa offrire comunque un'esperienza multisensoriale che comporti una fisicità e un'interazione più intima senza recare danno ai reperti originali. Una possibile soluzione è quella di creare repliche autentiche di manufatti originali, copie verosimili che possano essere utilizzate sia per la manipolazione che per fini espositivi per preservare la conservazione dell'oggetto originale [5].

Questo processo, sebbene sia in grado di produrre copie estremamente somiglianti e spesso indistinguibili dai manufatti originali, è spesso un'operazione che comporta un impegno temporale significativo e potenzialmente molto costoso: necessita di maestranze esperte e qualificate che abbiano familiarità con materiali e processi. Per realizzare le repliche è anche possibile utilizzare calchi in silicone (o altri materiali come gesso o resina) a partire dagli oggetti originali che potranno essere riempiti con il materiale necessario. Questo tipo di procedura può essere rischioso però, perché gli oggetti fragili potrebbero danneggiarsi se non si presta la dovuta attenzione nel momento in cui si crea il calco; inoltre, se non adeguatamente protetto il silicone potrebbe contaminare il reperto. Un approccio più moderno per la creazione di una replica è quello della stampa 3D, diventata un'alternativa valida negli ultimi anni grazie all'aumento della qualità di stampa e alla diminuzione dei costi di tecnologie e materiali che ha portato ad un aumento per l'accessibilità del pubblico [5].

1.9 Stampa additiva

La stampa 3D è una tecnica di produzione di un oggetto tridimensionale a partire da un modello digitale. Nelle tecniche additive si utilizza un materiale di base come la plastica o la resina che viene fuso e depositato strato per strato fino ad ottenere l'oggetto desiderato. Tramite la stampa 3D si possono creare oggetti anche molto dettagliati e complessi in modo rapido, efficiente ed economico.

Ha acquistato popolarità negli ultimi anni ed ha iniziato ad essere riconosciuta a livello mondiale attraverso i media, utilizzata nei settori industriali più vari e in particolar modo nel campo del patrimonio culturale. Uno dei vantaggi principali di questo approccio è che è possibile campionare gli oggetti originali con tecniche non distruttive e non intrusive (usando metodi di scansione come la tomografia computerizzata a raggi X, la fotogrammetria o la scansione laser) che permettono di preservare il modello originale senza danneggiarlo. Queste tecniche permettono di creare repliche geometriche digitali spazialmente accurate e versatili perché possono essere corrette modificate o scalate a seconda della necessità. Infatti, questo tipo di approccio può essere utilizzato non solo per creare delle repliche maneggiabili da inserire nelle esposizioni, ma anche per promuovere la conservazione ed il restauro e facilitare la ricerca.

La potenzialità di questo mezzo è infatti data anche dal fatto che offre la possibilità di maneggiare una versione di un reperto ricostruito, dando la possibilità di restaurare artefatti danneggiati o incompleti, ricostruendo nel modo più verosimile possibile le parti mancanti e stamparne così una versione che si avvicina il più possibile all'originale fornendo quindi alcune informazioni in più rispetto all'originale.

I modelli 3D possono anche sostituire la fotografia nella registrazione a catalogo delle condizioni, garantendo una rappresentazione più accurata dell'oggetto in un momento specifico nel tempo, e possono essere inseriti in tour virtuali per permettere di osservare i reperti anche in un luogo geograficamente lontano.

1.10 Il senso del tatto

Dal momento che la tesi si concentrerà ampiamente sul senso del tatto in ambiente virtuale, si ritiene opportuno fornire i concetti base su come il corpo umano percepisca la stimolazione tattile in modo da capire quali siano le caratteristiche più importanti da tenere in considerazione per cercare di restituire nell'applicazione un *feedback* tattile il più possibile simile alla realtà ed efficace per gli obiettivi posti. Il senso del tatto è responsabile della percezione delle sensazioni tattili, consente di recepire caratteristiche fisiche degli oggetti che entrano in contatto con la pelle. Generalmente il tatto viene considerato come il senso che non può essere

ingannato o illuso, è quindi parte fondamentale del processo umano nel distinguere ciò che è reale da ciò che non lo è. Tutte le azioni che si compiono quotidianamente sono profondamente basate sul senso del tatto, consente di esplorare ed interagire con il mondo circostante [8]. Il responsabile della trasmissione delle informazioni tattili recepite al cervello è il sistema somatosensoriale, che è composto da meccanorecettori, recettori sensoriali specializzati che sono distribuiti su tutto il corpo, ma che sono particolarmente concentrati in aree come le dita, le mani e i piedi. Questi recettori sono sensibili a vari tipi di stimoli, come pressione, vibrazione, temperatura e contatto, ed inviano segnali elettrici lungo le vie neurali nel momento in cui vengono stimolati. Il sistema nervoso centrale riceve queste informazioni e le elabora generando la sensazione tattile corrispondente [9]. La sensazione tattile permette di distinguere diverse proprietà negli stimoli che recepisce, che insieme costituiscono il senso del tatto:

- Proprietà microgeometriche, ad esempio la texture, la ruvidezza, l'aderenza e la densità spaziale della superficie.
- Proprietà macrogeometriche, ad esempio la forma, la dimensione e la struttura di un oggetto.
- Proprietà spaziali, ovvero la posizione degli stimoli rispetto a un punto di riferimento. [9]

1.11 Senso del tatto il VR

Con il progressivo avanzare della qualità audiovisiva dei sistemi VR, si è dimostrato sempre più importante la necessità di fornire feedback tattili altrettanto realistici, così da poter trasmettere un'esperienza autentica, migliorare le prestazioni delle attività svolte e aumentare l'immersione dell'utente. Per questo motivo molti sistemi hanno cercato di replicare la sensazione del tatto nelle mani degli utenti, non solo per la comodità di interazione ma anche perché, come accennato in precedenza, è una delle parti più sensibili del corpo umano agli stimoli tattili [9].

Tuttavia, nonostante i progressi nel campo, l'integrazione di sistemi aptici efficaci si è rivelata molto più complicata rispetto ai corrispettivi audiovisivi[10].

I dispositivi di interazione attuali per i consumatori si basano principalmente su un sistema di vibrazione per restituire sensazioni tattili all'utente, che ovviamente non bastano per simulare un'esperienza di interazione realistica. Il dispositivo di interazione più comune utilizzato in VR consiste infatti in un set di controller che non possono realmente simulare il senso del tatto, ma che fungono più come strumenti che l'utente può utilizzare per afferrare o toccare un oggetto nell'ambiente virtuale. Utilizzare i controller significa però introdurre una terza parte nell'interazione, che

comporta una perdita di realismo ed immersione, rendendo tutto meno convincente [9].

Per introdurre tecniche aptiche immersive in VR sono state esplorate vaste gamme di tecniche, che vanno da tecniche aptiche attive a quelle passive, fino ad approcci misti che utilizzano tecniche ibride fra le due.

I sistemi attivi utilizzano attuatori o meccanismi in grado di esercitare attivamente forze direttamente sul corpo dell'utente, di solito richiedono però dispositivi complessi e sofisticati per poter fornire stimoli realistici. Questi sistemi possono utilizzare motori, elettromagneti o altri dispositivi per produrre stimolazioni fisiche che vengono percepite dall'utente come tattili.

Gli approcci aptici passivi invece si basano sulla manipolazione di oggetti fisici reali presenti nell'ambiente, accessori o oggetti sostitutivi, che vengono utilizzati come sostituti degli oggetti virtuali durante l'interazione nell'ambiente virtuale [11]. Questi oggetti sono simili alle loro controparti virtuali in termini di proprietà aptiche rilevanti e, per definizione, forniscono uno stimolo aptico passivo, proprio perché toccando superfici reali si elimina la necessità di simulare proprietà come la texture, la durezza, il peso, la forma e le dimensioni, che assicurano una percezione profondamente realistica che è dimostrato aumenti l'immersione in VR. Tuttavia, non è banale utilizzare oggetti fisici come fonte di stimoli tattili per la VR, e una crescente quantità di studi ha esplorato diversi approcci per farlo. In particolare, nella realizzazione di dispositivi del genere bisogna tenere in considerazione due importanti criteri per un utilizzo efficace [11].

- Criterio di similarità: Tutti i proxy aptici utilizzati dall'utente dovrebbero sembrare sufficientemente simili ai loro corrispettivi virtuali sia per quanto riguarda le proprietà dei materiali (come texture, durezza e temperatura) che per quanto riguarda le proprietà geometriche (come forma, dimensioni e peso).

- Criterio di collocazione: quando l'utente tocca un oggetto virtuale, questo dovrebbe essere collocato in modo co-locato con l'oggetto reale, in modo da consentire un'interazione fluida. La trasformazione dell'oggetto virtuale dovrebbe corrispondere alla posizione e all'orientamento dell'oggetto reale.

Ci sono studi in merito che si interrogano su quale sia il margine entro il quale ci si possa distaccare da questi criteri senza andare a influire eccessivamente sull'esperienza dell'utente, ovvero fino a che punto i designer possono spingere la discrepanza tra l'oggetto fisico e quello virtuale prima di rompere l'illusione. In particolare, nel campo della cosiddetta *Substitutional Reality*, Adalberto L. Simeone et al.[12] hanno cercato di capire con che grado di incongruenza sia possibile offrire una buona esperienza utente con l'obiettivo di utilizzare uno stesso oggetto fisico per oggetti virtuali diversi. Dal loro studio è emerso che in generale più l'oggetto fisico è simile a quello virtuale migliore è l'esperienza; tuttavia, se la discrepanza

aumenta nei punti dell'oggetto in cui l'utente è meno probabile che interagisca non si sono verificati significativi fastidi, per esempio la lama di una spada.

1.12 Avatar virtuali

Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione hanno trasformato il modo in cui si consumano le informazioni dei musei, si raccontano storie e si vive il patrimonio culturale. Infatti le istituzioni culturali in tutto il mondo stanno studiando nuovi modi convincenti per ampliare il pubblico e migliorare l'esperienza di visita. Dal momento che i musei dispongono di una grande quantità di informazioni sugli oggetti che conservano, devono riuscire ad organizzarli e a presentarli in modo tale che risultino interessanti senza però sovraccaricare i visitatori [13]; per questo motivo, la personalizzazione mediata digitalmente e l'apprendimento personalizzato stanno diventando tendenze prominenti negli ultimi anni. Risulta dunque importante esplorare, esaminare e valutare i fattori che possono influenzare la qualità dell'esperienza dell'utente in un ambiente VR adattando le narrazioni di questi oggetti alle nuove risorse tecnologiche e ai media digitali per riscoprire il patrimonio [13].

In questo frangente la VR e gli avatar virtuali permettono di integrare, migliorare e ampliare le informazioni museali attraverso la personalizzazione, l'interattività, l'esperienza utente e la ricchezza dei contenuti.

Un avatar virtuale, o *Virtual Human* (VH), in 3D è una rappresentazione computerizzata di un essere umano, o un alter ego di una persona, nella forma di un modello tridimensionale. I VH vengono normalmente utilizzati per umanizzare le esperienze virtuali nei videogiochi e nei tour virtuali [14].

È stato dimostrato che le guide multimediali in esperienze VR ed AR contribuiscono ad una migliore comprensione dei contenuti multimediali, forniscono informazioni coinvolgendo i visitatori in uno scambio interattivo che può portare ad una comprensione più profonda e a promuovere l'entusiasmo per i contenuti [15].

I VH possono rendere le storie presentate negli ambienti virtuali più credibili e influenzare gli utenti in modo positivo, possono motivare gli utenti a fruire i contenuti più a lungo e, tramite l'interazione, permettono di avere un'esperienza narrativa non strutturata senza però perdere informazioni critiche [13].

La presenza di VH aumenta il senso di presenza fungendo da "ponte tra ambienti fisici e virtuali", costituendo la base per interazioni significative in tali contesti. Inoltre, visitare un sito culturale in compagnia di una guida che racconta storie affascinanti sulle esposizioni diventa un'esperienza memorabile e, quando le guide umane sono una risorsa limitata o le porte di un museo o di una galleria sono chiuse, gli avatar virtuali possono portare queste esperienze a un pubblico più ampio e offrire un invito alla scoperta.

Come dimostrano ricerche precedenti, l'aspetto e il comportamento dei VH influiscono pesantemente sulla risposta dell'utente. Pertanto, è importante che i VH abbiano un aspetto, movimenti e suoni naturali [16]. La mancanza di realismo manifestata come incongruenze fisiche dei contenuti virtuali con l'ambiente (fisico o digitale) è nota come un fattore chiave di affaticamento osservato e di percezione errata delle distanze in tutti i tipi di display audiovisivi e di Realtà Estesa (o *Extended Reality*, XR). Ad esempio, quando i VH fanno parte dei contenuti aumentati, la mancanza di realismo in animazioni molto semplici e ordinarie provoca un disprezzo per il risultato finale, a causa dell'effetto di *uncanny valley*. Per evitare tali incongruenze, i VH dovrebbero essere il più realistici possibile, inclusi il loro aspetto, le animazioni e il parlato.

In questa tesi si propone dunque un sistema che integra l'interazione tattile con reperti museali ad un curatore virtuale che accompagna personalmente l'utente nell'esperienza, fornendo informazioni dettagliate e supporto durante il percorso per offrire all'utente un'esperienza coinvolgente, immersiva e didattica.

1.13 Organizzazione Contenuti

Il presente documento è suddiviso in capitoli che espongono l'evoluzione del progetto: di seguito verranno esposti brevemente per aiutare a organizzare i contenuti e il processo di sviluppo.

In particolare, il secondo capitolo presenta lo stato dell'arte in cui si inserisce l'applicazione fornendo una panoramica sugli argomenti trattati. Nel terzo capitolo vengono elencati e descritti gli strumenti software e hardware utilizzati per lo sviluppo dell'applicazione.

Il quarto capitolo illustra il processo di progettazione, descrivendo in dettaglio le funzionalità dell'applicazione e presentando il *Design Document*.

Il quinto capitolo presenta i passaggi che hanno portato alla realizzazione del progetto. Nel sesto capitolo vengono esposte le conclusioni tratte da questo percorso e vengono discussi eventuali sviluppi futuri.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Di seguito verranno esposti alcuni esempi significativi per illustrare il contesto in cui l'applicazione VR realizzata si inserisce. Per tutte le ragioni esposte nel capitolo precedente e per poter confrontare le caratteristiche principali dell'applicazione con altri casi rilevanti dell'ambito, verranno presentati casi studio relativi alle cosiddette smart replica in campo museale, l'utilizzo di stampe 3D e oggetti reali come pure di VR in applicazioni VR.

2.1 Smart replica

2.1.1 Virtex

Virtex [17], acronimo per VIRTual EXhibit, è un progetto di storytelling museale che utilizza repliche interattive stampate in 3D come interfacce tangibili e dispositivi di narrazione. Gli utenti possono liberamente toccare e manipolare le repliche ed interagirci tramite sensori all'interno.

Sono state create due versioni dell'interfaccia: una pensata per poter prendere in mano la replica e manipolarla, l'altra per rappresentare oggetti di dimensioni più grandi che non possono essere presi in mano, come monumenti o siti.

Sulla superficie delle repliche sono stati aggiunti dei sensori sensibili al tatto nelle aree di interesse, con cui l'utente può interagire per triggerare piccoli video o animazioni su uno schermo adiacente che approfondiscono la storia dell'oggetto e spiegano le caratteristiche delle aree che sono state toccate.

All'interno delle stampe manipolabili è presente un sensore di orientamento che permette di visualizzare sullo schermo adiacente il modello virtuale della replica stessa che segue con precisione tutti i movimenti della stampa 3D in mano all'utente, così da poterne percepire la forma e i dettagli e vederne accanto la visualizzazione virtuale visualmente fedele.

I contenuti multimediali possono essere consultati sia su uno schermo posto accanto alle repliche sia tramite un proiettore: in questo modo l'esperienza risulta flessibile perché può essere fruita sia da un utente singolo che da utenti multipli. La tecnologia di Virtex è stata utilizzata in Belgio, nel Museo Provinciale di Archeologia in Ename, con "L'Oggetto d'Avorio" e per l'esibizione "Keys to Rome" con la statua de "L'Augusto di Prima Porta" e l'"Ara Pacis".

Nel lavoro pubblicato al riguardo tra i possibili sviluppi futuri di Virtex viene menzionata la possibilità di utilizzare un sensore di orientamento wireless per poter rendere l'interazione più fluida.

Figura 2.1: Virtex

2.1.2 Unlocking the story

Al museo di Manchester è stato esposto una replica della Stele di Hesysunebef, dove è esposto anche il reperto originale.

Il prototipo è stato creato realizzando tramite stampa additiva in PLA una replica della stele che è stata successivamente dipinta per fare in modo che assomigliasse visivamente all'originale. Sulla replica sono stati inseriti dei sensori tattili che, nel momento in cui vengono premuti, attivano contenuti multimediali riprodotti su uno schermo adiacente, consentendo al visitatore di esplorare temi complessi e simboli.

Come si può osservare dalla Figura 2.2 , la replica è piuttosto realistica, ed essendo realizzata in stampa additiva è sicuramente più economica e meno laboriosa rispetto a metodi tradizionali. Questo la rende quindi un'alternativa interessante rispetto a soluzioni più costose o impegnative. Tuttavia, la creazione di un oggetto simile richiede comunque le competenze specifiche di un professionista per ottenere una replica accurata. In questa tesi si propone quindi l'utilizzo della VR per semplificare il processo e renderlo facilmente replicabile.

Figura 2.2: UnlockingTheStory

2.2 Stampa additiva e oggetti reali in VR

2.2.1 Physically touching virtual objects

Uno dei primi studi eseguiti nel campo della stimolazione tattile passiva in VR è stato condotto da Hunter G.Hoffman nel 1998 [18]. Nel suo studio, Hoffman ha esplorato l'impatto del contatto fisico con un oggetto virtuale sulla percezione di realismo dell'ambiente virtuale da parte dell'utente. È importante sottolineare

che, nel 1998, l'hardware della VR e la grafica computerizzata erano a un livello completamente diverso rispetto alle tecnologie odierna.

Sebbene si tratti di uno studio piuttosto datato nel campo della VR, si ritiene importante menzionarlo perché il lavoro di Hoffman ha posto le basi delle ricerche nel campo ed è stato uno dei primi a dimostrare in modo empirico la validità dell'uso dell'interazione tangibile come un approccio semplice ed economico per aggiungere texture fisiche e stimlazioni tattili agli ambienti virtuali.

Nel suo esperimento, Hoffman ha utilizzato un sistema Division ProVision 100 con un visore Division dVisor™ HMD, un sensore magnetico di marca Polhemus per tracciare la posizione dell'oggetto e un guanto per tracciare i movimenti della mano.

L'esperimento esplora l'impatto del tocco fisico di un oggetto virtuale sulle previsioni dell'utente riguardo alle proprietà di altri oggetti virtuali con cui non avrebbe interagito direttamente. I soggetti per lo studio sono stati divisi in due gruppi, uno che avrebbe interagito con l'oggetto in questione, in questo caso un piatto all'interno di una cucina virtuale, tramite l'interazione tangibile, e il secondo che invece avrebbe solo visto l'ambiente virtuale e interagito con esso attraverso un controller. Dai risultati dell'esperimento è emerso che i soggetti del primo gruppo hanno percepito gli altri oggetti come più solidi e pesanti, più "reali", più influenzati quindi dalla gravità rispetto ai partecipanti del secondo gruppo.

2.2.2 Passive haptic feedback for object manipulation in VR

In una tesi magistrale del Politecnico di Torino [9] è stato fatto un confronto tra vari metodi di interazione con oggetti all'interno di un ambiente virtuale, analizzando fattori come accuratezza, velocità, tempo di esecuzione e livello di realismo ed immersione, confrontando poi i risultati con l'esecuzione dello stesso compito nel mondo reale. In particolare, l'obiettivo era confrontare l'interazione tramite oggetti aptici passivi con i metodi di interazione tradizionali. I metodi di interazione che sono stati confrontati sono:

- controller VR tradizionali (in questo studio è stato utilizzato il visore VIVE htc);
- Leap Motion Controller;
- repliche in scala di oggetti reali;
- repliche con differenze a livello di caratteristiche fisiche con gli oggetti reali corrispondenti.

Per tracciare gli oggetti sono stati utilizzati dei marker ottici tracciati da camere OptiTrack (su ogni oggetto è stato necessario posizionare tre marker, sferici o piatti). Ogni oggetto necessita di un posizionamento asimmetrico unico dei marker per fare in modo che vengano tracciati nel modo corretto. È stato necessario eseguire una calibrazione tra il sistema di riferimento della camera per tracciare i marker e il visore, per fare in modo che la posizione e l'orientamento degli oggetti reali corrispondesse alle controparti virtuali. Lo studio è stato condotto attraverso tre

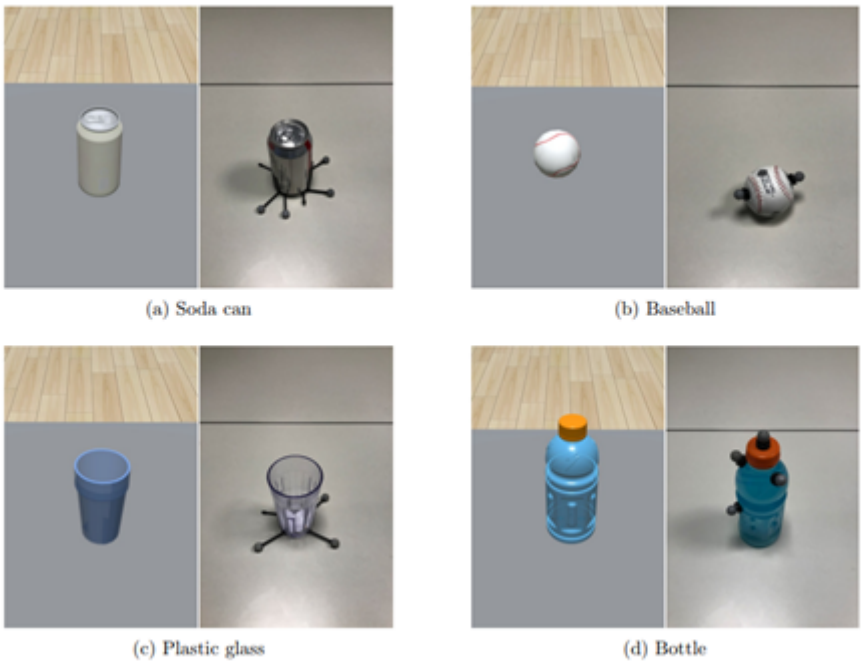

Figura 2.3: Marker sugli oggetti fisici

diverse esperienze sviluppate su Unity per testare i diversi metodi e si è osservato che i risultati ottenuti dipendono fortemente dal tipo di attività che è stata testata. Nella prima esperienza è stato condotto un test basato sulla legge di Fitts per valutare la velocità e l'accuratezza del movimento di un utente rispetto a un bersaglio. Nella seconda esperienza, l'attenzione è stata rivolta all'interazione in relazione a specifici compiti all'interno di una cucina virtuale, in cui l'utente doveva interagire con utensili da cucina. Nella terza esperienza, il focus era sulla capacità di spostare oggetti in posizioni specifiche su diverse superfici nello spazio.

In generale, l'uso di oggetti reali ha aumentato il livello di realismo e immersione dell'esperienza. I compiti sono stati più facilmente eseguibili utilizzando oggetti fisici che assomigliassero il più possibile alle loro controparti virtuali. Tuttavia, nelle attività in cui la forma dell'oggetto non era particolarmente rilevante, la discrepanza tra gli oggetti è risultata di importanza secondaria. Viene evidenziato

che la presenza dei marker sugli oggetti tracciati è stata percepita come invasiva durante l'interazione. Si suggerisce pertanto di trovare una soluzione che riduca al minimo l'interferenza dei marker sull'esperienza di interazione.

2.2.3 Augmented virtuality using touch-sensitive 3D-printed objects

Uno studio dell'università di Pisa del 2021 [19] ha presentato un sistema per integrare copie fisiche ed economiche di veri reperti, realizzati con tecnologie di stampa additiva, in un ambiente VR. Il sistema offre la possibilità di interagire con la replica fisica dei reperti nell'ambiente virtuale tramite un dispositivo per tracciare le mani in tempo reale e un controller elettronico personalizzato per la rilevazione tattile capacitiva, permettendo di visualizzare l'aspetto originale del manufatto e modificarlo toccandone la superficie.

L'applicazione è stata creata su Unity utilizzando un visore HTC Vive, un Vive Tracker per tracciare il movimento del reperto e lo strumento Leap Motion Controller per il tracciamento delle mani. Il tracker, i controlli per interagire con la replica e la replica stessa sono stati montati su un supporto stampato anch'esso in 3D (come mostrato in Figura ...). A causa del processo di montaggio del Leap Motion Controller sul tracker e delle diverse precisioni dei due dispositivi, è stato necessario realizzare un sistema di calibrazione per correggere gli errori delle posizioni relative nello spazio. Per rilevare in tempo reale l'interazione delle mani con i controller sul manico del supporto, viene utilizzato un microcontrollore Arduino.

La precisione del tracciamento delle mani è inferiore a 3 mm ma la qualità del tracciamento deteriora rapidamente nel momento in cui l'oggetto viene preso in mano e si verifica occlusione. Per questo motivo, nell'esperienza, non è possibile afferrare direttamente l'oggetto, ma viene utilizzato il manico del supporto come punto di interazione. Nel lavoro viene infatti specificato che, in seguito ai test che sono stati effettuati, l'esperienza potrebbe beneficiare di un metodo di interazione e calibrazione migliore al fine di ottimizzare l'immersione e il coinvolgimento dell'utente. Un altro possibile sviluppo futuro che viene evidenziato per migliorare l'esperienza è quello di rendere il reperto stampato il più possibile simile all'originale, includendo quindi caratteristiche come il peso e la distribuzione del peso, per offrire una stimolazione tattile più verosimile all'utente e aumentare l'immersione.

Questo studio presenta un sistema e un approccio per integrare oggetti fisici in un ambiente virtuale, simile a quello che sarà presentato in questa tesi. Tuttavia, dall'analisi di questo studio sono emerse alcune criticità che sono state prese in considerazione nel lavoro di ricerca presentato, cercando di affrontarle e risolverle in modo appropriato.

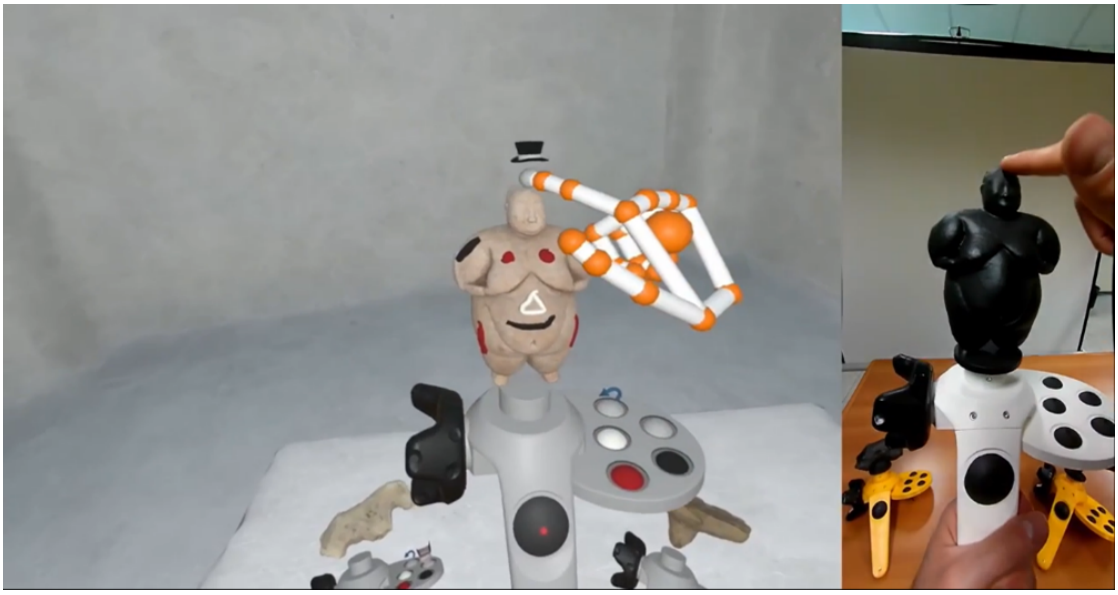

Figura 2.4: Interazione con la stampa

2.2.4 VRtefacts

Un lavoro dell'università Nottingham [20] presenta un'applicazione in MR che permette ai visitatori di un museo di maneggiare fisicamente stampe o scansioni 3D di oggetti museali e condividerne storie personali al riguardo. Lo studio esplora come coinvolgere gli utenti con la possibilità di manipolare direttamente repliche tangibili possa aumentarne la partecipazione e sollecitare interpretazioni personali. Anche in questa esperienza sono stati utilizzati il visore HTC Vive e i Tracker Vive per tracciare nello spazio gli oggetti fisici; non è stato però previsto l'utilizzo di un sistema per il tracciamento delle mani per poter maneggiare con più naturalezza gli oggetti.

Per l'esperienza sono stati utilizzati sei modelli 3D ridimensionati per poter essere maneggiati, dei quali tre sono stati stampati tramite stampa additiva mentre i restanti tre sono stati forniti come scansioni 3d virtuali.

Le stampe 3D sono state saldamente montate su scatole trasparenti in acrilico delle dimensioni di 20x20x10 cm, che contengono il dispositivo di tracciamento all'interno, mentre per le scansioni virtuali è stata utilizzata una scatola delle dimensioni di 15x15x30 cm che, in VR, appare come una teca di vetro con all'interno il modello virtuale, ma che in realtà è una scatola in acrilico che contiene il tracker (Figura 2.5).

Dai test che sono stati effettuati, su soggetti che non erano consapevoli prima dell'esperienza che avrebbero avuto la possibilità di manipolare oggetti fisici, è emerso che sia le stampe che i modelli virtuali hanno favorito un coinvolgimento

visivo che ha trasmesso un senso di solidità e realtà, ma che molti dei partecipanti erano significativamente più coinvolti dalle stampe 3D piuttosto che dalle scansioni.

Tra gli elementi che vengono indicati come possibili sviluppi futuri da esplorare ci sono le caratteristiche fisiche degli oggetti, come la scala, i materiali e il peso, e l'utilizzo di una rappresentazione delle mani in VR.

Figura 2.5: Oggetti stampati montati sui tracker

2.2.5 Associating real objects with virtual models for VR Interaction

Il lavoro in [21] presenta un sistema prototipale per associare oggetti reali con modelli virtuali in base alla forma e ai dettagli tattili in uno scenario VR.

L'obiettivo dello studio è quello di mitigare il rischio di collidere con gli oggetti dell'ambiente fisico attorno all'utente nel momento in cui l'utente è immerso in VR, cercando di rendere l'ambiente fisico stesso percepibile ed interagibile. Per associare un oggetto fisico ad uno virtuale vengono utilizzati tecniche di visione artificiale per riconoscere gli oggetti reali in una scena e tracciarne il movimento, per poter poi essere visualizzati nelle loro controparti virtuali. Dal momento che spesso la forma di un oggetto virtuale può essere insolita, non è facile trovare una corrispondenza esatta nell'aspetto, lo studio mira a trovare controparti con stimolazioni simili dal punto di vista visivo e tattile. Per rendere la manipolazione degli oggetti più

naturale vengono utilizzati dei supporti visivi, come contorni luminosi sugli oggetti interagibili e il tracciamento delle mani eseguito tramite nuvola di punti.

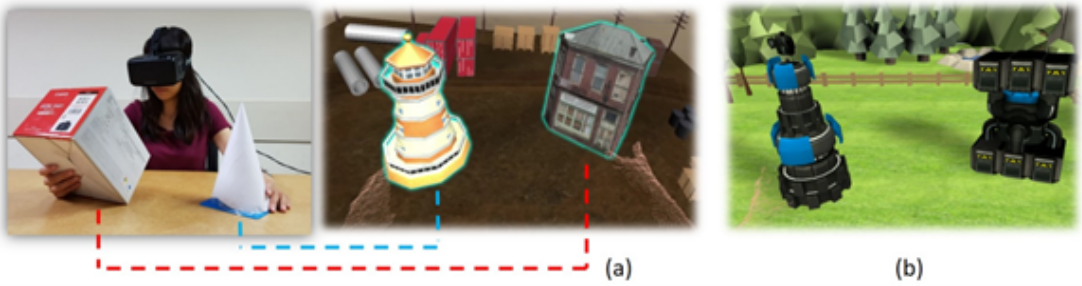

Figura 2.6: Oggetti reali associati alle controparti virtuali

Figura 2.7: Nuvola di punti

2.2.6 VR Haptics at home

Un lavoro molto recente [22] ha presentato un metodo per utilizzare oggetti comuni all'interno della propria casa come interfacce tattili passive, in modo da poter offrire esperienze con stimolazioni tattili in VR con costi e configurazioni minime, senza la necessità di utilizzare attrezzatura costosa o specializzata. L'esperienza è stata sviluppata utilizzando il visore Meta Quest e il tracciamento delle mani, prevede l'utilizzo del proprio tavolo come base per un gioco del tipo "colpisci la talpa", una sedia come cannone per un gioco di tiro e un cuscino come gatto da accarezzare. Per configurare l'esperienza l'utente deve posizionare il controller contro l'oggetto fisico e premere il grilletto per posizionare di conseguenza l'oggetto virtuale interattivo. Una volta posizionati tutti gli oggetti virtuali l'utente posiziona i controller a faccia in giù in un luogo sicuro che consente al sistema di passare automaticamente alla modalità di rilevamento delle mani così da poter interagire direttamente con gli oggetti virtuali con le proprie mani.

Nel momento in cui l'oggetto è stato individuato e configurato utilizzando il controller, si assume che l'oggetto sia stazionario oppure segua i movimenti delle mani, quindi la posizione dell'oggetto virtuale viene aggiornata in base al movimento delle mani, senza bisogno di tracciarne direttamente la posizione tramite tecnologie o dispositivi di tracciamento.

I test sono stati effettuati confrontando la versione con gli oggetti fisici con una versione con le stesse modalità di gioco ma utilizzando i controller per interagire solo in aria con gli oggetti virtuali. Dai risultati è emerso che in generale l'esperienza con stimolazione tattile ha ricevuto una valutazione più alta in quanto a immersione e realismo; tuttavia, gli utenti hanno sperimentato gradi di inconvenienza per via di alcune incongruenze tra stimolazione tattile e visiva, dovuti alla differenza tra l'oggetto fisico e l'oggetto virtuale. Quindi, tra i possibili sviluppi futuri viene considerata la possibilità di migliorare il tracciamento degli oggetti e la corrispondenza tra oggetto virtuale e reale, tramite per esempio la deformazione automatizzata delle forme virtuali.

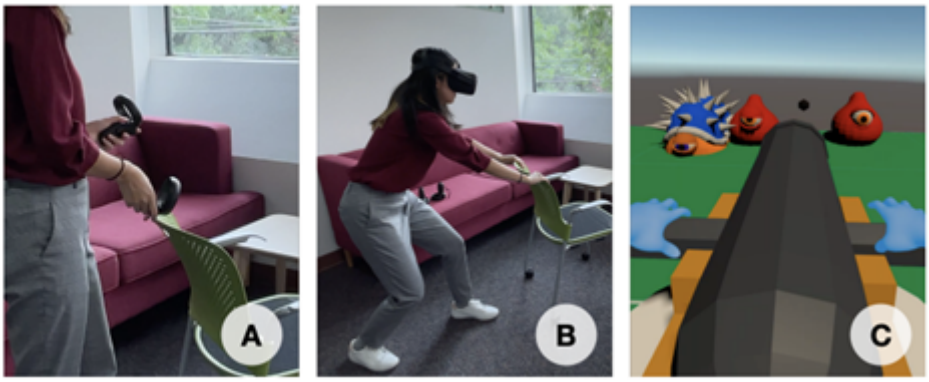

Figura 2.8: VRHaptics At home

2.2.7 Tangiball

Il lavoro in [23] propone un sistema di gioco del calcio tangibile in VR, nel quale gli utenti interagiscono con un pallone appositamente realizzato con due tracker ottici all'interno per tracciarne il movimento. Gli utenti possono vedere attraverso il visore la rappresentazione virtuale del pallone ed interagirvi direttamente in tempo reale con i loro piedi, a loro volta forniti di dispositivi di tracciamento.

Per l'esperienza è stato utilizzato un sistema di cattura del movimento ottico: un visore HTC Vive all'interno di una stanza con due base station sistemate in angoli opposti in modo avere la visibilità massima e l'area di tracciamento più ampia e funzionale possibile.

Il pallone tangibile è stato realizzato su misura con due semisfere trasparenti con diametro di sei pollici, con all'interno un attacco personalizzato, stampato tramite stampa additiva, per montare un tracker su ognuna delle due facce in modo che non si verifichino problemi di occlusione. Tangiball è stato progettato come un gioco in stile carnevale: vengono resi visibili dei punti di partenza su cui l'utente deve portare il pallone facendolo rotolare con il piede e successivamente, viene presentato un obiettivo in una posizione casuale. L'utente calcia il pallone con i piedi, cercando di farlo fermare all'interno dell'obiettivo e se ci riesce viene attivato un effetto di particelle e riprodotto un suono di successo. Le ricompense si basano sul sistema delle tre stelle, a causa della sua ampia adozione e semplicità (tre stelle se il pallone si ferma sul cerchio centrale giallo, due stelle per l'anello rosso intermedio e una stella per l'anello esterno blu). All'inizio del gioco viene presentata una singola schermata di istruzioni che spiega all'utente il loro obiettivo con brevi testi e disegni.

Dai test, risultati promettenti, è emerso che gli utenti si sono interfacciati con il Tangiball in modo naturale ed intuitivo dichiarando di trovarlo facile e divertente.

Questi ultimi due esempi non sono direttamente correlati al lavoro che verrà presentato, ma rappresenta un buon esempio del potenziale dell'integrazione di oggetti reali in VR per aiutare gli utenti nell'esecuzione di un compito.

Figura 2.9: Tangiball

2.2.8 Using real objects for interaction in VR

L'università di Okayama ha pubblicato un lavoro [24] nel quale viene studiato quale tipo di interazione con gli oggetti mostrati in VR possa essere più funzionale, se mezzi standard come controller, mouse o gamepad, oppure oggetti reali con forme simili a quelle visualizzate tramite il visore nell'ambiente virtuale.

Il sistema di gioco sviluppato per l'esperimento prevede che il giocatore difenda la sua base dagli attacchi nemici utilizzando quattro pistole per scacciarli, e le pistole possano essere ruotate per cambiarne la direzione di tiro. I test effettuati

confrontano due modalità di gioco: una in cui si utilizza il mouse per interagire con gli oggetti virtuali, e l'altra che usa oggetti reali.

Per l'esperienza viene utilizzato il visore GearVR che, tramite la telecamera presente sul visore stesso, permette di tracciare la posizione e l'orientamento degli oggetti reali, che sono cilindri esagonali stampati tramite stampa additiva con dei marker posizionati sulle facce.

Dai test effettuati è emerso che in generale è risultata più efficiente la versione con i controller tradizionali, principalmente per via dei problemi di tracciamento: infatti sono state riscontrate delle difficoltà nel riconoscimento degli oggetti reali per via della posizione della camera e per l'occlusione dei marker presenti sugli oggetti; inoltre, il fatto che non venga mostrato nel visore la posizione reale delle mani rende più difficile l'interazione. Tuttavia, per la maggior parte dei soggetti testati la presenza degli oggetti ha reso l'esperienza più immersiva e coinvolgente. In questo studio viene presentata una versione meno complessa di un sistema che utilizza oggetti fisici in VR rispetto alle soluzioni esaminate in precedenza; tuttavia, se ne può apprezzare la semplicità dello sviluppo e la compattezza del sistema.

Bisogna però notare che per portare oggetti reali in VR è di estrema importanza utilizzare un sistema di tracciamento affidabile.

Figura 2.10: Oggetto stampato con marker

2.2.9 Escape room in MR: 10th Annual 3DUI Contest

Un esempio di utilizzo di oggetti reali come interfaccia aptica passiva sono le nove applicazioni realizzate per il *10th annual IEEE 3DUI Contest* [25], nel quale i partecipanti sono stati sfidati a creare applicazioni con stimolazioni aptiche passive in ambienti MR. Tra i requisiti opzionali per il contest era incluso l'utilizzo del tema Escape Room per l'ambientazione virtuale, con il fine di rendere le esperienze più interessanti per i partecipanti; tuttavia, alcuni dei partecipanti

hanno realizzato altri scenari, utilizzando le interfacce aptiche passive per simulare situazioni specifiche di addestramento, come l'utilizzo di un quadro di controllo per pompa antincendio o per analizzare campioni a temperature criogeniche. Sette dei nove partecipanti hanno utilizzato il visore HTC Vive insieme ai Vive Tracker per tracciare i movimenti degli oggetti fisici nell'applicazione. Alcuni di loro hanno utilizzato ulteriori Vive Tracker per tracciare i movimenti delle mani, sebbene questi non forniscano informazioni sul tracciamento delle dita. Altri partecipanti hanno invece utilizzato il Leap Motion Controller o guanti aptici per il tracciamento delle mani.

Due partecipanti hanno utilizzato oggetti stampati con stampa additiva come interfacce aptiche nelle applicazioni.

Questi esempi sono interessanti nel contesto di questa tesi poiché mostrano diverse applicazioni dell'uso di oggetti reali in VR. Tuttavia, poiché si tratta di un contest del 2019, le tecnologie di tracciamento delle mani non avevano le prestazioni attuali. Di conseguenza, si possono notare alcune difficoltà nell'interazione, sottolineate anche in alcuni dei lavori del contest, specialmente per quanto riguarda il contatto con gli oggetti fisici e l'occlusione. Questi studi hanno evidenziato che, nonostante l'uso di oggetti reali possa migliorare il realismo e l'immersione nell'esperienza virtuale, le limitazioni delle tecnologie di tracciamento delle mani possono rappresentare una sfida nell'effettiva interazione con tali oggetti.

2.3 Avatar virtuali

2.3.1 Hold the world

Hold the world [26] è un'esperienza educativa in VR che permette di trovarsi faccia a faccia con Sir David Attenborough, celebre divulgatore Inglese, all'interno di un ambiente virtuale ricostruito del Museo di Storia Naturale di Londra. Tramite questa applicazione è possibile vedere reperti rari ed aree generalmente chiuse al pubblico guidati proprio dall'avatar ad alta qualità di Sir David Attenborough realizzato tramite una registrazione video volumetrica. Lo storytelling per ogni reperto inizia quando l'utente lo estrae da un cassetto presente sul tavolo, e per far proseguire lo storytelling è invitato ad interagire con gli oggetti trascinandoli in aree specifiche o guardandone alcune parti evidenziate. L'utente fruisce l'esperienza seduto, interagendo con i modelli dei reperti virtuali tramite i controller del visore e il tracciamento dello sguardo tramite i quali può osservare da vicino gli oggetti ruotandoli ed ingrandendoli. I reperti sono accompagnati dalle spiegazioni di Sir David Attenborough e da animazioni uniche e a dimensione reale.

Figura 2.11: Hold the World

2.3.2 Mingei Project

In un articolo [16] del 2012 viene presentato un progetto realizzato in VR ed AR, commissionato dal Chios Mastic Museum, che si propone di preservare l'antica arte della coltivazione e lavorazione del mastice.

Nell'applicazione sono stati utilizzati VH per fornire ai visitatori informazioni sulle macchine presenti nel museo e sulla vita delle persone di quell'epoca. I VH utilizzati nell'applicazione sono stati sviluppati tramite una pipeline economica che copre tutte le fasi di creazione e presentazione, concentrandosi sull'aspetto estetico, il movimento, e il linguaggio parlato. L'articolo presenta una *pipeline* di produzione VH realistici per applicazioni in ambito culturale, con l'obiettivo di ottenere il massimo realismo possibile con tempi e costi contenuti. Viene spiegato che ricerche precedenti hanno dimostrato che l'aspetto visivo e il comportamento dei VH influiscono notevolmente sulla risposta degli utenti.

L'applicazione è stata sviluppata su Unity. I VH sono stati creati utilizzando il software CC3, mentre le animazioni sono state registrate tramite *motion capture* con attori reali, per ottenere movimenti fluidi e realistici. Per consentire ai VH di narrare le storie desiderate, è stato utilizzato il software Salsa LipSync, in grado di produrre animazioni realistiche di sincronizzazione labiale ed espressioni facciali. Questo software è compatibile sia con Unity che con CC3. Nell'applicazione si può interagire con i personaggi avvicinandosi ad essi e poi selezionando gli argomenti sui quali si desidera un approfondimento.

Grazie a questa combinazione di strumenti, sono stati creati VH personalizzati

e realistici, capaci di narrare le storie desiderate e offrire un'esperienza immersiva agli utenti della piattaforma.

Figura 2.12: Avatar applicazione Mingei

2.3.3 Digital avatars as humanized museum guides

Nel lavoro riportato in [27] viene analizzato il ruolo di avatar digitali all'interno di contesti museali, con un caso studio specifico riguardante una guida olografica per l'applicazione in AR presso un museo archeologico in Spagna. Il lavoro argomenta come l'utilizzo di avatar virtuali può risultare un mezzo efficace ed economico per coinvolgere nuovi pubblici nelle esperienze museali.

L'applicazione descritta può essere utilizzata tramite HoloLens 1 all'interno del museo. L'esperienza inizia con una presentazione introduttiva in cui un avatar olografico di nome Cleia, nelle vesti di un personaggio storico romano, presenta e spiega l'esperienza e come interagire con gli ologrammi. Dopo l'introduzione iniziale vengono rese disponibili quattro presentazioni interattive posizionati in quattro importanti punti storici del museo, che possono essere selezionate tramite il tracciamento delle mani del dispositivo.

L'avatar è posizionato a distanza minima di due metri dal visitatore e, grazie alle funzionalità di tracciamento di HoloLens, stabilisce un contatto visivo con gli utenti.

L'avatar è stato realizzato tramite video eseguiti in uno studio con *chroma key*.

È stato necessario girare più di trenta video per scena per raccogliere tutte le reazioni e le frasi che l'avatar utilizza per rispondere interattivamente alle richieste dei visitatori. Questa applicazione, sviluppata in realtà aumentata, non ha richiesto la creazione di un modello 3D dell'avatar virtuale. Tuttavia, rappresenta un esempio

interessante di come un personaggio virtuale possa essere utilizzato come mezzo alternativo e innovativo per la narrazione e l'interazione nel contesto culturale.

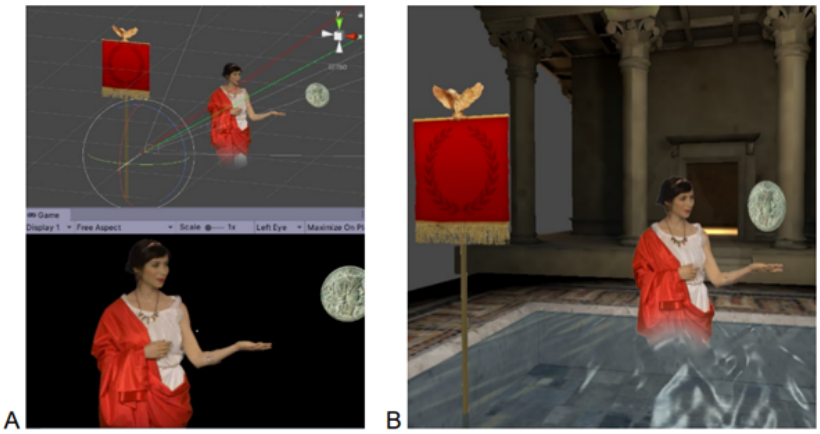

Figura 2.13: Digital avatars as humanized museum guides

Capitolo 3

Tecnologie

In questa tesi sono state impiegate tecnologie sia nel campo del software che dell'hardware. Di seguito verrà quindi fornita una panoramica di queste tecnologie utilizzate e dei loro ruoli nell'ambito del lavoro di ricerca.

3.1 Software

3.1.1 Unity

Unity è una piattaforma di sviluppo software che permette di sviluppare applicazioni in ambito VR, giochi, simulazioni e altre esperienze interattive multipiattaforma in 2D o 3D. È composta da un *game engine*, una *service suite* e un *Integrated Development Environment* (IDE) sviluppati da Unity Technologies.

È dotata di un solido motore fisico che supporta le dinamiche dei corpi rigidi, il rilevamento delle collisioni e il *raycasting*. Queste funzionalità sono fondamentali per sviluppare fisica realistica, gestire le interazioni tra gli oggetti e permettere il rilevamento delle collisioni tra gli elementi del mondo virtuale. Tramite questi strumenti gli sviluppatori possono creare ambienti virtuali coinvolgenti e interattivi che rispondono in modo realistico alle azioni degli utenti.

Unity è molto affermata nell'ambito grazie anche al negozio di risorse completo con cui gli sviluppatori possono avere accesso ad un'ampia gamma di risorse, inclusi modelli, texture e file audio, che possono rivelarsi fondamentali per agevolare e velocizzare il processo di sviluppo.

Grazie alla comunità ampia e attiva gli sviluppatori possono trovare molte risorse e tutorial per aiutarli a imparare e migliorare le loro capacità, è infatti utilizzata sia a livello consumer che professionista.

La combinazione di editor e motore di gioco permette di sviluppare l'applicazione ed eseguirla facilmente per verificarne il funzionamento.

Per questa tesi è stato scelto di utilizzare Unity come piattaforma di sviluppo perché c'era la necessità di sfruttarne la vasta gamma di funzionalità e la notevole flessibilità per integrare diverse componenti all'interno dell'applicazione.

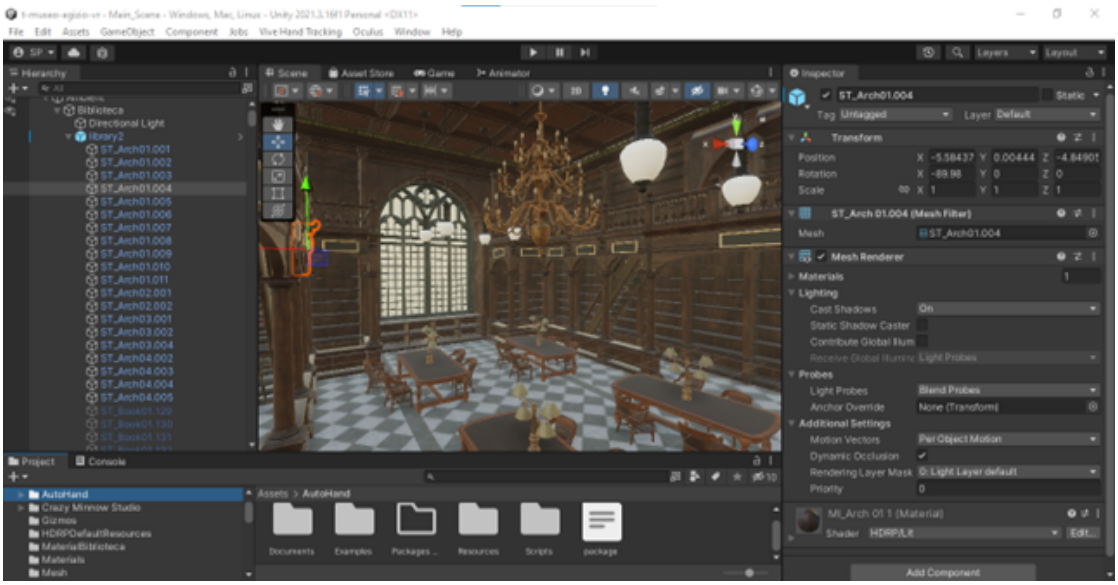

Figura 3.1: Interfaccia di Unity

3.1.2 Blender

Per la modellazione 3D e le animazioni è stato utilizzato il software di grafica Blender.

Blender è un programma gratuito e open source di grafica 3D, rilasciato nel 1994 da NeoGeo, uno studio di animazione olandese. Supporta l'intera pipeline di creazione 3D: modellazione, rigging, animazione, simulazione, rendering, compositing, motion tracking, UV mapping, texturing ed editing. Per gli utenti più esperti offre anche la possibilità di utilizzare script in linguaggio Python.

Uno dei punti forza principali di Blender è la modellazione, che permette di generare modelli tridimensionali dettagliati tramite un'ampia gamma di strumenti e tecniche. All'interno del software si possono utilizzare sia strumenti di modellazione sia poligonali che basati su curve e superfici, dando la possibilità di modellare anche forme complesse con accuratezza e controllo.

La community di Blender è estremamente attiva grazie alla sua natura open source, e questo porta a una vasta gamma di risorse disponibili per gli utenti. Sono disponibili numerosi tutorial,che coprono vari aspetti del software, plugin e addon che offrono funzionalità aggiuntive, che lo rende uno dei programmi più versatili nel campo.

Figura 3.2: Interfaccia di Unity

3.1.3 Fusion 360

Per la realizzazione dei reperti è stata usata una combinazione dei software Blender e Fusion 360, unendo le potenzialità di Blender con gli strumenti specifici per la modellazione precisa di parti meccaniche di Fusio 360.

Fusion 360 è un software di progettazione CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing) sviluppato da Autodesk. È un'applicazione basata su cloud che permette l'utilizzo di un set completo di strumenti per la modellazione e la progettazione 3D. Con questo software è possibile utilizzare un'ampia varietà di strumenti per la modellazione solida, di superficie, la progettazione parametrica e la modellazione organica. Possono essere create forme complesse tramite operazioni booleane, curve di controllo, deformazioni e molto altro.

3.1.4 Ultimaker Cura

Ultimaker Cura è un software open source di slicing sviluppato da Ultimaker. Il software è stato progettato per essere compatibile con le stampanti 3D Ultimaker, ma viene usato anche per altre stampanti 3D FFF/FDM. Il software viene utilizzato per svolgere una una funzione fondamentale nella preparazione dei modelli 3D per la stampa. Si occupa di scomporre il modello 3D in strati sottili, "slices", in modo che possa essere stampato. Genera un file di stampa che contiene le istruzioni precise per la stampante 3D indicando parametri come la velocità di stampa, la

temperatura dell'estrusore, il riempimento (infill), il supporto e altre specifiche che condizionano il risultato finale della stampa.

Cura include nell'interfaccia anche strumenti che permettono di generare il supporto, e la possibilità di posizionare e orientare modello sulla piattaforma di stampa in base alle esigenze.

Dopo aver inserito il modello da stampare nel software è possibile visualizzare un'anteprima del modello diviso in slices così da poter vedere come appariranno stampa e supporto per valutare se è necessario fare eventuali modifiche o ottimizzazioni.

3.1.5 Salsa Lip Sync

Per animare il labiale della curatrice viruale è stato utilizzato Salsa Lip Sync, che è compatibile con il motore grafico Unity. SALSA Lip Sync è un plugin per Unity sviluppato da Crazy Minnow Studio che viene utilizzato per fornire funzionalità avanzate per la sincronizzazione labiale e l'animazione facciale di personaggi virtuali. SALSA Lip Sync analizza l'audio in tempo reale e genera movimenti labiali realistici e sincronizzati con il parlato di conseguenza. Il plugin riconosce i visemi per mappare l'audio in ingresso ai movimenti delle labbra dell'avatar. SALSA Lip Sync fornisce anche funzionalità per l'animazione facciale che consentono di creare movimenti espressivi del volto in sincronia con il parlato. Si possono animare le sopracciglia, gli occhi, il naso e altre parti del viso, aggiungendo ulteriori dettagli e realismo alle espressioni facciali del personaggio.

Figura 3.3: Salsa Lip Sync

3.2 Hardware

3.2.1 Meta Quest 2

Il Quest 2 è un visore per la VR sviluppato da Reality Labs, una divisione di Meta Platforms. È stato rilasciato inizialmente nel 2020 con il nome Oculus Quest 2 per poi essere rinominato in seguito Meta Quest 2 nel 2022 in seguito al rebranding di Facebook, Inc. come Meta.

È un aggiornamento del predecessore Oculus Quest con cui condivide un design simile, ma con caratteristiche migliorate tra cui un peso più leggero, un display con una risoluzione ed un tasso di aggiornamento più elevati ed una durata della batteria dei controller migliorata. Può essere utilizzato sia come visore autonomo standalone con un sistema operativo interno basato su Android, sia con software compatibili installati su computer desktop a cui ci si può collegare tramite USB o Wi-fi.

Il display è costituito da un singolo pannello LCD con risoluzione 1832x1920 pixel e una frequenza di aggiornamento in grado di raggiungere i 120 HZ.

Figura 3.4: Meta Quest 2

3.2.2 Vive Tracker

Per tracciare il movimento e l'orientamento del reperto sono stati utilizzati i Vive Tracker 2018.

I Vive Tracker sono dispositivi del sistema di tracciamento sviluppati da HTC. Sono strumenti di acquisizione del movimento che possono essere indossati o fissati a oggetti per tracciarne il movimento nello spazio tridimensionale. Per utilizzarli ogni Vive Tracker necessita di essere collegato al PC tramite un dongle USB.

Le base station, anche conosciute come Lighthouse, sono dispositive di tracciamento esterno che emettono segnali laser per creare un campo di tracciamento nella stanza in cui viene utilizzato il sistema HTC Vive. Viene consigliato di posizionare

le base station in angoli opposti della stanza per un tracciamento ottimale per determinare con precisione la posizione e l'orientamento nello spazio dei dispositivi.

Le base station e i tracker comunicano tra loro utilizzando tecnologie wireless, permettendo un tracciamento preciso e in tempo reale del movimento.

Sono stati progettati per funzionare insieme in un sistema integrato con un'ampia copertura di tracciamento e una buona precisione. Sono ampiamente utilizzati in vari campi come l'industria del gaming, della simulazione e in altri settori che sfruttano la tecnologia VR.

Figura 3.5: Vive Tracker 2018

3.2.3 Ultimaker S5

I modelli che sono stati stampati in questo progetto sono stati prodotti tramite la stampante Ultimaker 5. Ultimaker 5 è una stampante 3D di alta qualità sviluppata da Ultimaker, un'azienda olandese. È l'ultima versione della serie di stampanti sviluppate da Ultimaker, nota per la sua affidabilità, precisione e facilità d'uso.

Questa stampante offre numerose funzionalità avanzate che la rendono adatta sia per uso professionale che per gli appassionati di stampa 3D. Utilizza la tecnologia di deposizione fusa (FDM), che consente di creare oggetti aggiungendo strati di materiale fuso uno sull'altro su un piano di lavoro. Supporta molti materiali di stampa, tra cui PLA, ABS, PETG, nylon e altri ancora.

l'Ultimaker 5 dispone di un display touchscreen intuitivo che facilita la navigazione nei menu e la gestione delle impostazioni di stampa.

Dispone di un piano di stampa con dimensioni XYZ di 330 x 240 x 300 mm, che consente di stampare oggetti di grandi dimensioni.

Figura 3.6: Ultimaker S5

Capitolo 4

Progettazione

4.1 Obiettivi, materiali e metodi

Lo scopo principale del sistema proposto è quello di consentire all'utente di interagire in un ambiente virtuale, in cui è possibile manipolare una replica fisica a basso costo di un reperto ed esplorare informazioni e curiosità dettagliate al riguardo tramite l'interazione con un curatore virtuale.

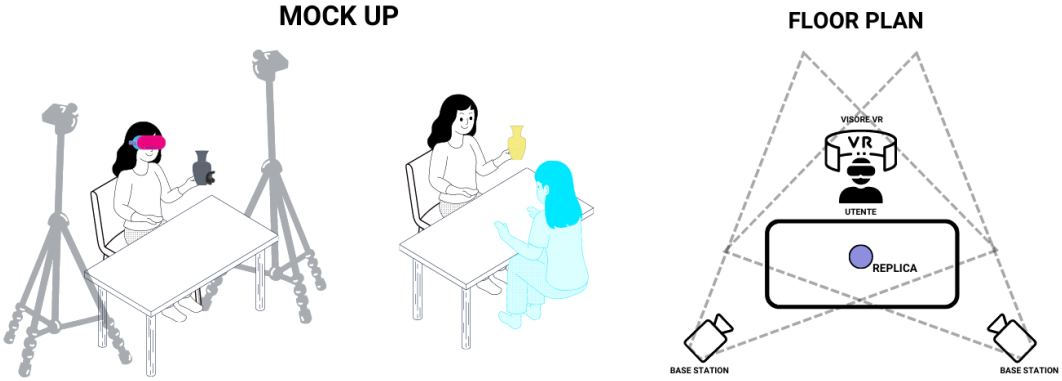

Figura 4.1: Mock Up Esperienza

L'utente può vedere l'aspetto originale dell'oggetto ed interagirci direttamente con mano.

Gli obiettivi principali sono:

- aumentare l'aspetto visivo di una copia fisica a basso costo di un artefatto utilizzando un dispositivo di VR, sovrapponendo virtualmente l'aspetto originale dell'oggetto originale sulla replica;

- aumentare l'impatto emotivo dell'utente dandogli la possibilità di manipolare tramite le mani la replica fisica all'interno dell'ambiente virtuale, sfruttando le potenzialità della stimolazione tattile;

- aumentare l'immersione e il coinvolgimento dell'utente tramite l'interazione con un curatore virtuale che lo guida nell'esperienza.

Per raggiungere gli obiettivi elencati sopra è necessario soddisfare i seguenti requisiti:

- calcolare la posizione e l'orientamento dell'oggetto fisico nell'ambiente virtuale utilizzando una soluzione di tracciamento robusta per garantire un sovrapposizione precisa e accurata del modello virtuale 3D dell'oggetto originale sulla replica;

- mostrare le mani dell'utente nell'ambiente virtuale, tracciando il movimento di entrambe le mani in modo accurato per garantire un'interazione funzionale e piacevole.

- rilevare quando e dove l'utente tocca la replica per agevolare l'interazione;

- presentare un curatore virtuale realistico ed interattivo per aumentare l' immersività, mantenendo la *pipeline* flessibile e scalabile;

- soddisfare tutti i requisiti precedenti in tempo reale per garantire un'esperienza utente di alta qualità;

Per soddisfare tutti i requisiti è stato progettato un sistema composto da componenti hardware personalizzate e librerie software.

Nella figura 4.2 viene mostrato uno schema delle componenti principali dell'applicazione,*software*, *hardware* e oggetti stampati.

Il componente hardware è responsabile del tracciamento della replica nell'ambiente virtuale e del tracciamento delle mani dell'utente. La libreria software, distribuita sull'hardware della replica e sul PC che esegue l'esperienza, raccoglie tutti i dati prodotti dai dispositivi hardware, calibra i sistemi di riferimento, gestisce l'interazione con il curatore virtuale e restituisce visivamente tutte queste informazioni agli utenti.

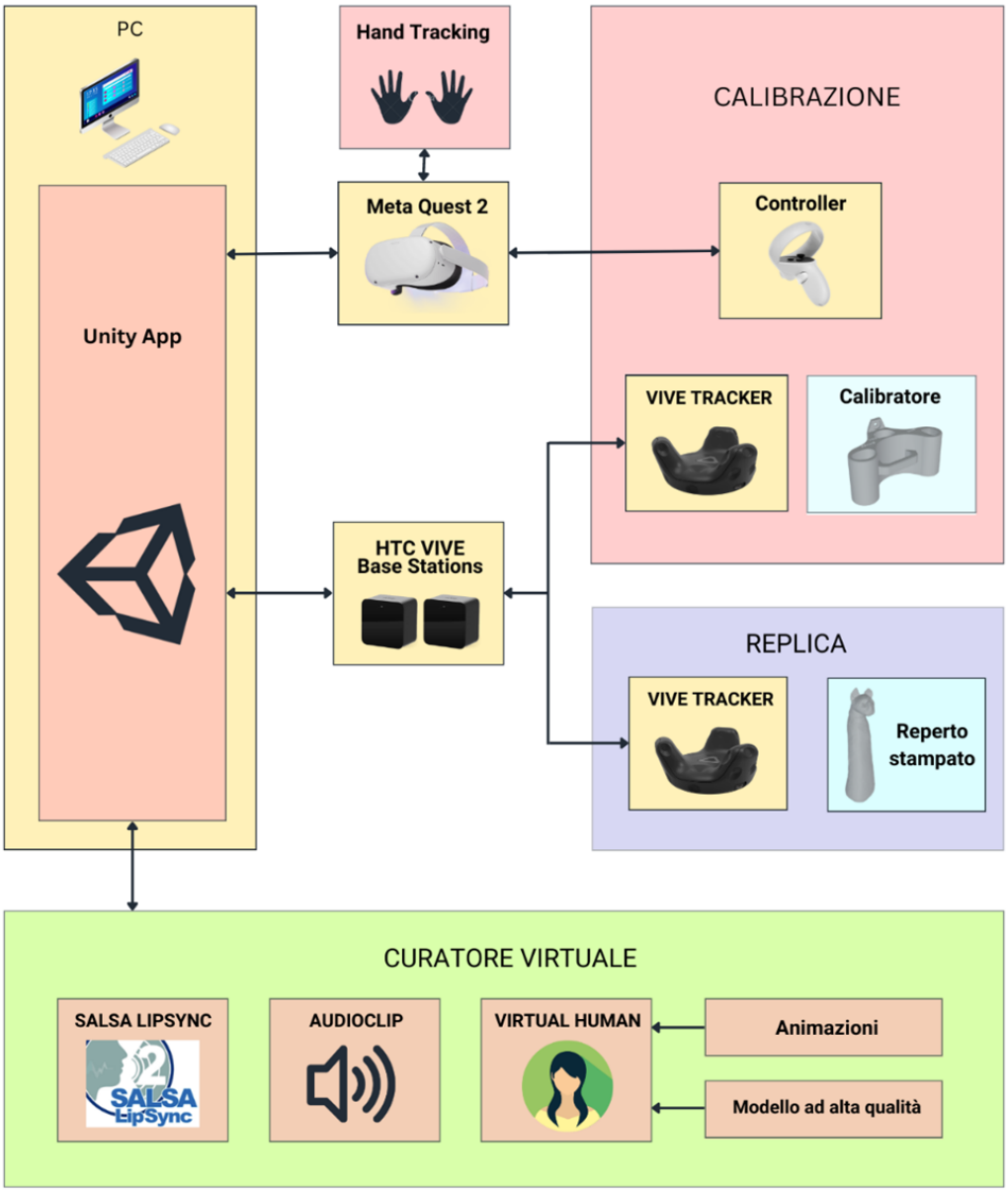

Figura 4.2: Schema componenti principali applicazione

4.1.1 Configurazione hardware

La configurazione hardware proposta comprende:

- visore per l'esperienza visiva in VR, in questo caso il Meta Quest 2 con il

relativo controller per eseguire la calibrazione;

- Vive Tracker per tracciare il movimento della replica e per eseguire la calibrazione.
- basestation vive, per rilevare la posizione e l'orientamento dei tracker e passare queste informazioni all'app per far corrispondere la posizione dell'oggetto reale con la controparte virtuale;
- PC.

Le specifiche del funzionamento delle varie fasi del sistema verranno presentate nel capitolo sull'implementazione.

4.2 Design document

Nel documento di design verranno descritti tutti gli aspetti fondamentali dell'applicazione e del suo sviluppo.

Di seguito vengono elencati i punti per descrivere il flusso dell'esperienza utente nella sua interezza:

1. Configurazione iniziale:
   - L'utente si siede nella postazione designata e indossa il visore VR.
   - Viene fornita una breve fase di configurazione per calibrare il sistema e scegliere gli oggetti che verranno presentati nell'esperienza.
2. Ingresso nell'ambiente virtuale:
   - Dopo la configurazione, l'utente viene trasportato nell'ambiente virtuale. Si troverà seduto ad un tavolo di una biblioteca virtuale.
3. Guida virtuale:
   - Una guida virtuale è presente nell'ambiente e assume il duplice ruolo di fornitore di informazioni sugli oggetti e di guida dell'esperienza.
   - La guida virtuale fornisce spiegazioni, suggerimenti e indicazioni all'utente durante il percorso nel mondo virtuale.
4. Esplorazione e interazione:
   - L'utente è libero di esplorare l'ambiente virtuale, interagire con gli oggetti e scoprire i dettagli e le caratteristiche dell'ambiente.

- Tramite il tracciamento delle mani l'utente può interagire direttamente con la replica stampata dei reperti, prenderli in mano ed esplorarli.
- La guida virtuale fornisce indicazioni su cosa osservare o sperimentare per massimizzare l'esperienza.

5. Interazione con la curatrice
6. Conclusione dell'esperienza
    - Alla fine dell'esperienza, l'utente viene guidato attraverso un processo di uscita dal mondo virtuale, rimuovendo il visore e tornando alla realtà. .

4.2.1 Ambiente

Figura 4.3: Ambiente

Come ambiente virtuale per ospitare l'esperienza è stata scelta una biblioteca di Oxford, i cui asset sono stati presi online [28], assemblati su Blender e importati su Unity. È stata scelta una biblioteca classica in modo da richiamare un luogo culturale ed offrire un'esperienza immersiva e coinvolgente che fosse però di impatto scenico e visivamente accattivante per il visitatore.

L'utente viene posizionato all'interno della biblioteca di fronte ad un tavolo in legno; sopra il tavolo è poggiato la replica del reperto e dietro vi è seduta la curatrice virtuale.

Le grandi finestre ad arco permettono alla luce di filtrare nello spazio, creando un'illuminazione naturale e invitante. Numerose lampade sono strategicamente distribuite sui tavoli e sul soffitto per creare un'atmosfera accogliente. L'ambientazione è completamente ricoperta da libri di varie dimensioni, creando una

scenografia ricercata che incoraggia l'utente a immergersi nell'esperienza con una disposizione favorevole all'apprendimento.

Al fine di ottenere un'ambientazione il più realistica possibile, è stata adottata la *pipeline* di rendering HDRP (High Definition Render Pipeline). Questa scelta permette di aumentare il grado di fotorealismo nell'ambiente, offrendo una resa visiva di alta qualità e dettagliata. L'utilizzo di HDRP contribuisce a creare un'esperienza immersiva, in cui gli elementi visivi appaiono più vividi, con una maggiore fedeltà alle luci, alle ombre e ai materiali presenti nell'ambiente.

4.2.2 Configurazione

L'applicazione si apre con la fase di configurazione, una scena separata da quella principale nella quale è possibile scegliere quali oggetti inserire nell'esperienza.

Per selezionare gli elementi da configurare, è stata implementata un'interfaccia utente (UI) con cui l'utente può interagire direttamente utilizzando le proprie mani, tramite gli strumenti dell'Interaction Toolkit. La UI guida l'utente attraverso i passaggi necessari, mostrando le istruzioni passo dopo passo nel momento in cui l'utente esegue le azioni corrispondenti. Il prototipo dell'applicazione è stato sviluppato utilizzando una singola replica stampata, tuttavia l'applicazione è stata progettata per gestire più oggetti contemporaneamente e in modo tale che si possano facilmente aggiungere nuovi reperti in un secondo momento.

Durante la fase di configurazione, è possibile scegliere gli oggetti desiderati da una lista e assegnare a ciascun oggetto il Vive tracker corrispondente, in modo che l'oggetto fisico e la sua controparte virtuale coincidano.

Prima di assegnare il reperto al tracker, è necessario eseguire la calibrazione per allineare il sistema di riferimento del visore con quello dei tracker. Si seleziona il tracker presente nel calibratore e si preme il tasto del controller per avviare la calibrazione. Il calibratore deve essere posizionato sul tavolo di fronte all'utente perché il sistema utilizza le sue coordinate per posizionare il tavolo virtuale corrispondente a quello fisico e orientare correttamente l'intero ambiente virtuale.

L'allineamento preciso degli elementi reali dell'ambiente con quelli virtuali aumenta l'immersione nell'esperienza.

4.2.3 Reperto

Il progetto di tesi originale spiega il processo decisionale che ha portato alla scelta specifica dei reperti mostrati nell'esperienza.

Una condizione fondamentale che è stata presa in considerazione è quella della maneggevolezza, la dimensione dei reperti deve permettere una manipolazione efficiente e quindi consentire agli utenti di afferrare e ruotare comodamente gli oggetti per osservare comodamente ogni dettaglio. Sono stati selezionati oggetti

ricchi di dettagli e contenuti aggiuntivi interessanti, al fine di stimolare l'interesse dei visitatori e spingerli a scoprire ogni particolare.

L'esperienza prevedeva la possibilità di osservare più da vicino reperti appartenenti alla mostra "Archeologia Invisibile" [2] del Museo Egizio di Torino, menzionata in precedenza nell'introduzione: una mummia di gatto (C. 2348/1: mummia di gatto del tipo a birillo), e due vasetti in alabastro provenienti dalla tomba di Kha e Merit (S. 8441-8445, S. 8447-8448).

In questa applicazione si è deciso di utilizzare come prototipo da stampare in 3d la mummia di gatto per due motivi principali. Innanzitutto la dimensione del reperto (dim) consente una manipolazione agevole e soddisfacente, permettendo al contempo l'applicazione del tracker per tracciarne il movimento senza causare fastidi durante l'uso. Il tracker presenta infatti un diametro di circa 10 cm, che se applicato su un oggetto di dimensioni troppo piccole potrebbe effettivamente causare disagi nel momento in cui si va a manipolare. In secondo luogo, l'oggetto stesso presenta dettagli molto fini sulla superficie, rendendolo estremamente interessante da scoprire e toccare con le mani. La generazione di una *mesh* di altissima qualità ha permesso di stampare un modello estremamente preciso e ricco di dettagli che arricchisce l'esperienza tattile invitando gli utenti ad esplorarne i dettagli con le mani. La *mesh* della mummia di gatto è stata realizzata tramite

Figura 4.4: *mesh* ottenuta della Mummia di Gatto

rilievo fotogrammetrico dai professionisti del museo Egizio e di 3D Flow. La fotogrammetria è una tecnica utilizzata per creare modelli tridimensionali di oggetti

fisici o ambienti reali utilizzando fotografie o immagini. Consiste nell'analizzare e combinare una serie di fotografie scattate da diverse angolazioni per ricostruire la forma, la geometria e la struttura dell'oggetto o dell'ambiente fotografato.

La ricostruzione è stata effettuata scattando 178 foto girando attorno al soggetto posto su una superficie con colore bianco uniforme e mirando sempre al suo baricentro, per poi essere processate tramite il software 3DF Zephyr. Tramite questa tecnica è possibile andare a generare un modello 3d estremamente preciso senza danneggiare in alcun modo il reperto originale.

Una particolarità della mummia di gatto, che la rende un oggetto particolarmente adatto ad essere utilizzato per una esperienza in VR, è che può assumere tre diversi aspetti a seconda della texture applicata. È importante sottolineare che tali trasformazioni avvengono in modo virtuale e non danneggiano in alcun modo il reperto originale.Il primo aspetto è quello originale che un visitatore potrebbe osservare in una visita al museo tradizionale. Questa rappresentazione preserva l'aspetto attuale della mummia di gatto, mantenendo intatta la sua integrità fisica e i suoi dettagli visibili.Gli altri due aspetti sono il risultato di studi archeometrici effettuati sul reperto. Gli esperti sono stati in grado di ricostruire l'aspetto originale del reperto, basandosi su informazioni e analisi delle bende e dei pigmenti utilizzati nell'antico Egitto. Questo ha permesso di creare una versione virtuale della mummia di gatto con i colori delle bende attendibili, consentendo ai visitatori di vedere come potrebbe essere apparsa originariamente.

Figura 4.5: Texture alternative

Inoltre, tramite la scansione del reperto, è stato possibile creare una versione

virtuale della mummia di gatto sbendata. Questo permette di osservare virtualmente lo scheletro dell'animale presente all'interno, senza alterare o danneggiare la mummia reale.

Tutte queste trasformazioni e ricostruzioni avvengono nel contesto della VR, dove i visitatori possono esplorare e osservare la mummia di gatto in modi altrimenti impossibili o limitati in un museo tradizionale. Ciò offre un'opportunità unica di comprendere e apprezzare l'aspetto originale del reperto, nonché di studiarne dettagli altrimenti nascosti.

4.2.4 Interazione con la curatrice

L'esperienza nell'applicazione precedente prevede un'interazione con la curatrice tramite controller nella quale si avviano i contenuti in sequenza. Nel momento in cui l'utente finisce di ascoltare l'audio corrente preme un pulsante del controller, quando è pronto a proseguire, per attivare l'audio successivo. Con l'interazione aptica passiva prevista per questo progetto si è dovuto studiare un nuovo modo per far proseguire l'esperienza e gestire l'interazione. Dal momento che non ci sono i controller si è infatti osservata la necessità di trovare un modo alternativo il più efficace e naturale possibile per poter interagire con la curatrice ed attivare gli audio della narrazione, che non sia solo un'esperienza passiva di fruizione ma che rimanga interattiva. Si è inoltre tentato di rendere l'esperienza meno rigidamente strutturata rispetto a quanto non fosse inzialmente per dare più libertà all'utente nell'esplorare i contenuti.

Si è quindi deciso di sviluppare tre tipi di interazione diversa per valutare quale potesse essere il tipo più adeguato per l'esperienza.

I primi due tipi prevedono un'interazione tramite UI, che consente all'utente di interagire direttamente con l'interfaccia tramite le mani.

Nella prima versione, viene fornita un'interfaccia standard a menù in cui l'utente può selezionare la traccia desiderata tramite i pulsanti, su cui sono presenti i titoli delle tracce sotto forma di testo per identificarne l'argomento.

La seconda versione prevede un'interazione più diegetica e più diretta con l'oggetto. prendendo ispirazione dall'interfaccia di "Hold the world" citata nel capitolo 2, si sono realizzati dei pulsanti che si presentano come icone sprite 2D sul reperto che possono essere selezionati tramite le mani. Con questo tipo di interfaccia, si cerca di stimolare ulteriormente l'utente a interagire con il reperto, invitandolo ad esplorarlo più a fondo. Per la terza modalità di interfaccia si sviluppata un'interazione che prevede l'utilizzo della voce al posto delle mani, dando la possibilità all'utente di interagire direttamente con la curatrice e porre domande riguardo agli argomenti disponibili a voce. Per realizzarlo è stato utilizzato Rasa, una piattaforma open-source per lo sviluppo di chatbot basati sulla lingua naturale. Nella fase di addestramento, si utilizzano i dati di addestramento per

insegnare al modello come interpretare i messaggi degli utenti e come rispondere in modo appropriato. I dati di addestramento comprendono esempi di messaggi degli utenti, insieme alle relative etichette di intento (ciò che l'utente intende comunicare) e di entità (informazioni rilevanti all'interno del messaggio). Una volta addestrato, il modello può essere utilizzato per gestire le interazioni degli utenti. Quando un utente invia un messaggio al chatbot, il modello di Rasa elabora il testo per determinare l'intento dell'utente e le eventuali entità correlate. Successivamente, il chatbot può generare una risposta adeguata basata sulle regole definite nello sviluppo. L'utente può quindi porre domande alla curatrice basate sugli argomenti elencati precedentemente e riceve una risposta dopo che l'intento è stato elaborato dal chatbot.

Figura 4.6: Interfacce

Tutte e tre le interfacce prevedono una stessa struttura dell'esperienza. Nel momento in cui l'utente viene inserito nell'ambiente virtuale, la curatrice presenta l'esperienza tramite un audio di benvenuto che lo invita ad interagire con il reperto e a prenderlo in mano. Una volta preso in mano il reperto viene attivato l'audio che introduce il manufatto stesso, elenca gli argomenti disponibili e spiega all'utente come funziona il tipo di interazione. In seguito l'utente può attivare i contenuti successivi interagendo con l'interfaccia specifica. I contenuti riguardo a questo particolare reperto sono stati divisi in quattro argomenti. Una volta che tutti i contenuti sono stati fruiti, la guida conclude l'esperienza con un audio finale.

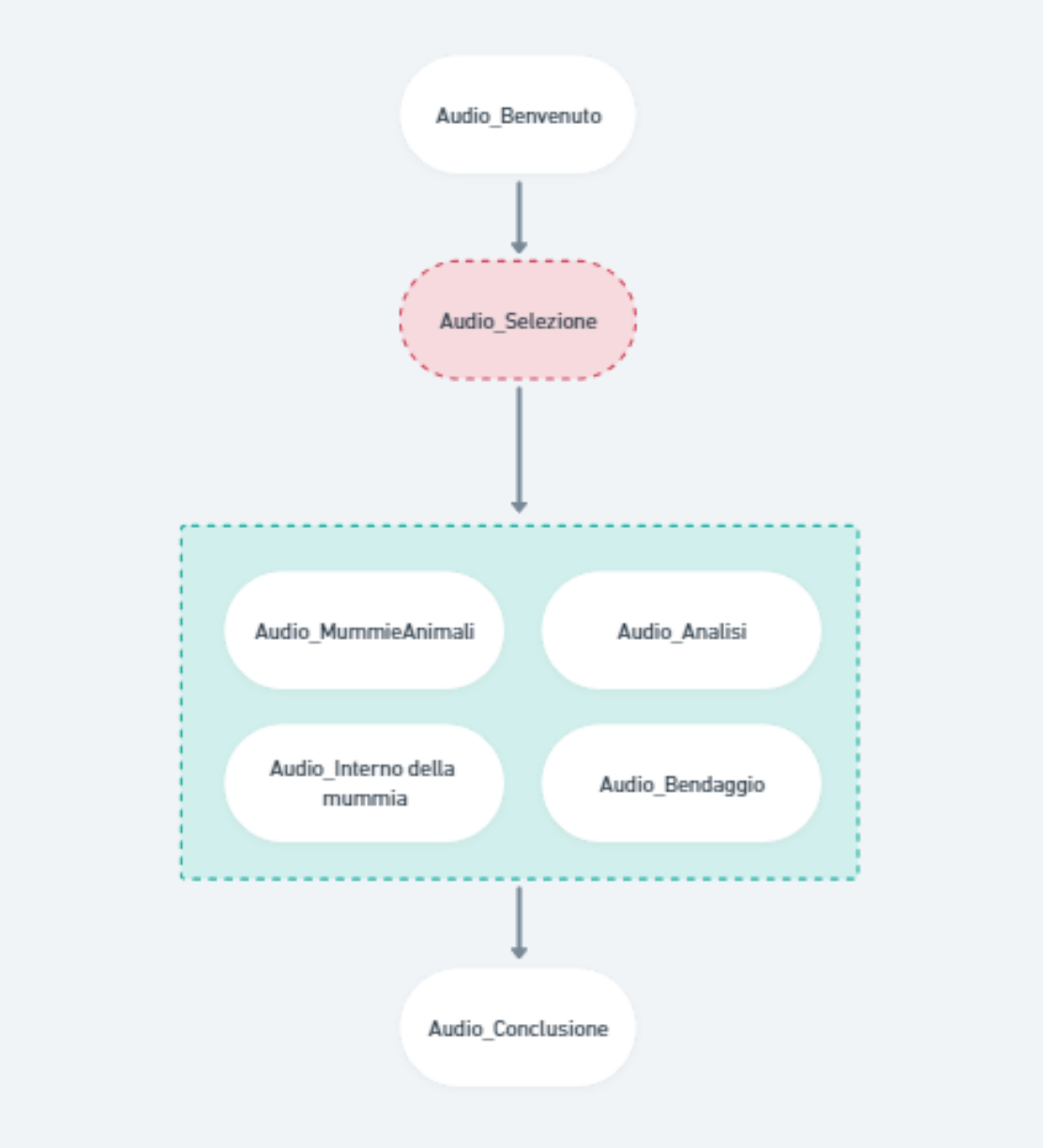

Figura 4.7: Struttura esperienza

Capitolo 5

Realizzazione

5.1 Introduzione

In questo capitolo verranno approfondite le diverse fasi che hanno portato alla realizzazione dell'applicazione. Inizialmente, è stata condotta una fase di studio sulle tecnologie disponibili così da poter identificare gli approcci e i dispositivi più adeguati per raggiungere gli obiettivi prefissati. Parallelamente a questa fase di studio, è stato avviato il lavoro sul prototipo di stampa del reperto, al fine di ottenere una replica fisica del reperto stesso su cui testare l'interazione.

Successivamente, sono state dedicate risorse alla creazione di un'entità digitale umana, con l'obiettivo di renderla il più realistica possibile mantenendo la pipeline flessibile. Dopo aver completato queste fasi, si è proceduto con l'assemblaggio di tutte le diverse componenti nell'ambiente virtuale, utilizzando Unity. L'obiettivo principale è stato quello di rendere l'ambiente virtuale il più immersivo e coinvolgente possibile, creando un'esperienza interattiva e appagante per l'utente.

Durante l'intero processo, sono state adottate metodologie e approcci che hanno favorito l'integrazione e la sinergia tra le diverse fasi di sviluppo, al fine di garantire il successo e la coerenza complessiva dell'applicazione.

5.1.1 Sistema

Il progetto iniziale prevedeva l'utilizzo del visore HTC Vive per l'esperienza, principalmente per la sua compatibilità con i Vive Tracker. Tuttavia, durante lo sviluppo iniziale del sistema è emerso che il tracciamento delle mani integrato con il visore non forniva le caratteristiche e la precisione necessarie per soddisfare le esigenze dell'esperienza. Prendere in mano un oggetto occludeva la vista della camera del visore rendendo il tracciamento delle mani molto problematico, e la posizione delle mani virtuali non corrispondeva in modo preciso a quelle reali. Tuttavia, una dei requisiti principali dell'applicazione è un tracciamento delle mani e delle dita

estremamente preciso per consentire agli utenti di manipolare facilmente l'oggetto e studiarne i dettagli attraverso il senso del tatto.

Si è provato a risolvere il problema dell'occlusione forzando uno *snap* della mano sul modello virtuale ovvero forzando il posizionamento virtuale della mano sul modello virtuale nel momento in cui la mano entrava in contatto con l'oggetto. Tuttavia, questa soluzione si è rivelata poco funzionale ed estremamente dipendente dalla forma dell'oggetto. È stata quindi esplorata anche l'opzione del sistema di tracciamento delle mani Leap Motion Controller, che è stato utilizzato in molti casi di studio citati nel capitolo 2; tuttavia, si sono rivelate circa le stesse problematiche.

Successivamente si è provato il tracciamento delle mani del visore Meta Quest 2 e si è potuto constate che presenta precisione e prestazioni che si adattavano meglio alle esigenze di questo progetto. Nonostante l'utilizzo del tracciamento delle mani del Meta Quest 2 aumenti di molto l'usabilità dell'intera esperienza, comporta delle difficoltà di compatibilità con i Vive Tracker sviluppando l'applicazione su un motore grafico come Unity. Si è quindi dovuto implementare un sistema di calibrazione per far coincidere i due sistemi di riferimento per consentire il loro utilizzo simultaneo.

Figura 5.1: Interazione in VR con la replica

5.2 Stampa 3D e pipeline di produzione

I processi di stampa additiva utilizzano dati computerizzati 3D o file Standard Tessellation Language (STL), che contengono informazioni sulla geometria dell'oggetto permettendo di procedere alla stampa senza l'uso di attrezzi o stampi specifici per la parte.

Ci sono diversi tipi di tecnologie di stampa additiva, tra cui la modellazione a deposizione fusa (FDM), la stereolitografia (SLA), la sinterizzazione laser selettiva (SLS). Ogni tecnologia ha il proprio metodo unico per depositare, solidificare o legare il materiale di stampa ma in generale il funzionamento consiste nella costruzione di numerosi strati nella direzione X-Y uno sopra l'altro per generare la dimensione Z o la terza dimensione.

Per questa tesi è stata utilizzata la tecnologia di stampa FDM utilizzando la stampante ULtimaker S5, descritta nello specifico del capitolo sulle tecnologie. Il processo di stampa additiva si basa su una serie di fasi generali:

- Acquisizione: il modello 3D da stampare può essere creato da zero o ottenuto tramite la scansione 3D di un oggetto esistente.
- Progettazione: se il modello 3D deve essere creato da 0 o se necessita di essere modificato si utilizza un software di progettazione assistita da computer (CAD).
- Preparazione per la stampa: il modello 3D viene trasformato in un formato adatto per la stampa additiva, solitamente un file STL (Standard Tessellation Language). Questo file divide il modello in una serie di strati sottili, che saranno successivamente stampati uno sopra l'altro. La stampante additiva viene preparata per il processo di stampa. Questo può includere la carica del materiale di stampa (come filamenti di plastica o resine liquide) e la messa a punto dei parametri di stampa, come la temperatura e la velocità di estrusione.
- Stampa: la stampante additiva inizia a creare l'oggetto strato dopo strato, seguendo le istruzioni del file STL.
- Finitura: Una volta completata la stampa, l'oggetto può richiedere operazioni di finitura aggiuntive, come la rimozione dei supporti di stampa, la levigatura, la lucidatura o la verniciatura.

5.2.1 Progettazione

L'obiettivo principale durante la fase di progettazione è stato garantire un adeguato fissaggio del tracker alla replica stampata per fare in modo che fosse possibile

Figura 5.2: Fasi stampa additiva

tracciare il movimento dell'oggetto reale. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati considerati i seguenti requisiti:

- Il tracker deve essere saldamente fissato alla replica stampata, garantendo stabilità e riducendo al minimo le vibrazioni.
- Il tracker deve essere ancorato sull'oggetto con sempre lo stesso orientamento
- Il sistema di ancoraggio deve essere funzionale e pratico, consentendo un'installazione e una rimozione agevoli.
- Il posizionamento del tracker deve essere scelto in modo da non ostacolare l'interazione con l'oggetto.
- Il tracker deve essere collocato in una posizione visibile alle base station, per garantire un tracciamento ottimale.

5.2.2 Sistema di ancoraggio

Per progettare il sistema di ancoraggio sono state utilizzate le informazioni e le linee guida fornite nel manuale per sviluppatori del tracker VIVE 2018. Come si può vedere dall'immagine, il tracker VIVE è dotato di un meccanismo di ancoraggio standard per treppiede per fotocamere, che è composto da:

- 4.1 Vite da 1/4" per fissare l'accessorio.
- 4.2 Fessura per perno stabilizzatore per impedire la rotazione del tracciamento.

- 4.3 Porta a pin Pogo (tipo a contatto a molla) per una connessione elettrica opzionale all'accessorio.
- 4.4 Piastra di attrito per fornire una frizione stabile tra l'accessorio e il VIVE Tracker.

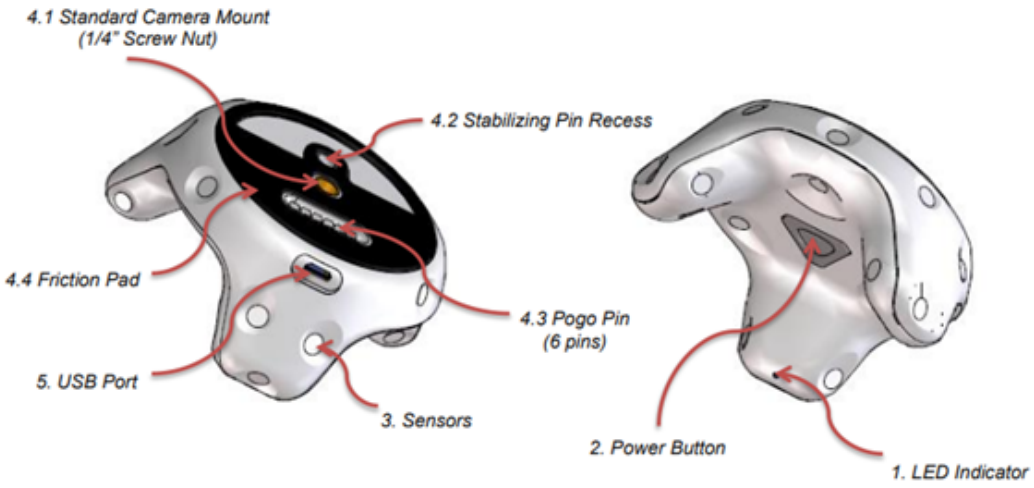

Figura 5.3: Sistema di ancoraggio Vive Tracker

Il campo visivo (*Field Of View*, FOV) del Vive Tracker (2018) è di 270 gradi. Nel manuale viene sconsigliato di posizionare la struttura all'interno dell'angolo di visuale in quanto ciò potrebbe ostacolare le risposte dai sensori del VIVE Tracker (2018) quando posizionato in quella direzione. Pertanto, è importante posizionare il tracker sull'oggetto in modo da ostacolare il meno possibile la vista.

Inizialmente si è valutato di avvitare semplicemente il tracker sul reperto sfruttando il foro filettato sul tracker. Tuttavia, questa soluzione non avrebbe soddisfatto tutti i requisiti elencati in precedenza. Infatti, il tracker avrebbe rischiato di svitarsi, compromettendo la stabilità e non consentendo un orientamento coerente per ogni applicazione. Pertanto, è stata presa la decisione di progettare un sistema che sfruttasse anche la fessura per il perno stabilizzatore presente sul dispositivo.

È stato scelto di utilizzare un meccanismo di incastro a slitta a scorrimento, che consente il movimento lineare di un oggetto lungo una traiettoria predefinita. Un meccanismo di incastro a slitta è composto da due parti principali: la slitta e la guida. La slitta è l'elemento mobile, mentre la guida fornisce una superficie di scorrimento o una traccia lungo la quale la slitta può muoversi.

Per questo scopo, è stato utilizzato un profilo a T, chiamato così perché assomiglia alla lettera T quando viene visualizzato in sezione trasversale. Il profilo a T è costituito da una base orizzontale (il tratto superiore della T) e da un elemento

verticale (il tratto verticale della T) che si estende dalla base. È stato progettato come parte integrante del modello, quindi la guida è stata incorporata nel modello 3D del reperto.

Il tracker viene avvitato alla slitta e successivamente la slitta viene fatta scorrere nel suo alloggiamento nel reperto. Questo sistema di fissaggio o viene poi assicurato con una vite per garantire la stabilità e la sicurezza dell'ancoraggio. Per ottenere un sistema funzionante a scorrimento nella stampa 3D, è stato necessario considerare le tolleranze corrette affinché la slitta potesse muoversi liberamente assicurando un ancoraggio saldo. L'obiettivo era consentire alla slitta di muoversi liberamente lungo il percorso prestabilito, evitando al contempo di avere troppo gioco. Tuttavia, è importante tenere presente che la stampa 3D presenta variazioni di precisione che devono essere considerati durante la progettazione del pezzo.

Non esistono tolleranze standard fisse per tutte le stampe 3D, poiché possono variare in base alla stampante utilizzata, alle impostazioni di stampa, alla variazione di temperatura, all'orientamento e ad altri fattori. In particolare, i fori e le forme circolari possono presentare una significativa variazione di dimensione tra il progetto e la stampa effettiva. Questo accade perché, durante il processo di stampa, i fori circolari vengono convertiti in poligoni con un numero limitato di lati, il che può causare un errore di dimensione inferiore rispetto a quanto previsto nel progetto iniziale. Pertanto, per ottenere un prototipo funzionante al meglio delle sue capacità, è stato necessario adottare un approccio empirico. Questo vuol dire sperimentare con diverse tolleranze e valutare in base ai risultati ottenuti se è necessario apportare regolazioni e iterare il processo di progettazione e stampa, in modo da garantire che il sistema di scorrimento funzioni in modo ottimale.

Si è iniziato quindi con una prova di stampa per valutare se le tolleranze scelte fossero accettabili per il sistema di scorrimento. Facendo riferimento alle tabelle ISO per le tolleranze foro/albero e confrontando le informazioni ottenute con i risultati empirici nel campo della stampa 3D, si è fatta una valutazione iniziale sulle dimensioni. In base a questa valutazione, si è determinato che una tolleranza compresa tra 0,25 mm e 0,50 mm per lato, quindi con un totale rispettivamente di 0.5 mm e 1 mm) potesse garantire un funzionamento adeguato.

Per la prima stampa, è stata progettata una versione ridotta della slitta, per ottimizzare il consumo del materiale, con una tolleranza di 0,5 mm per lato al fine di valutare la presenza di un gioco eccessivo all'interno della guida.

Si è riscontrato che la tolleranza utilizzata inizialmente era troppo ampia, poiché la slitta si muoveva eccessivamente all'interno della guida. Di conseguenza, si è deciso di ridurre la tolleranza slitta/guida a 0,25 mm. Per valutare l'efficacia di questa nuova tolleranza, si è scelto di testarla direttamente su un prototipo del meccanismo di ancoraggio anziché solo sul profilo a T. Sulla base delle osservazioni effettuate sulla stampa, si era abbastanza fiduciosi che la nuova tolleranza fosse funzionale.

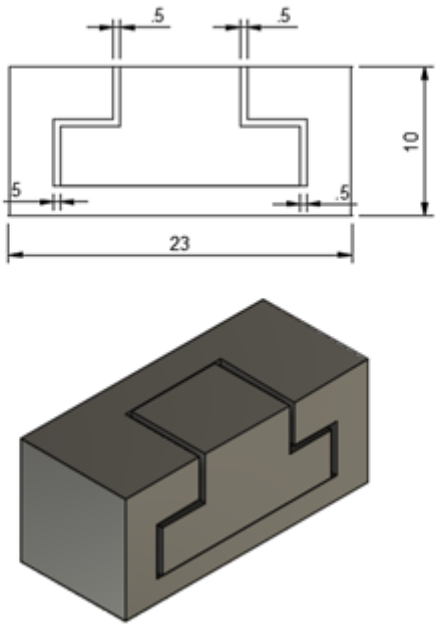

Figura 5.4: Versione ridotta slitta

Pertanto, è stato creato un modello di prototipo che includeva un foro per una vite da 1/4 di pollice, il perno stabilizzatore e i fori per la vite e l'inserto filettato per assicurare la slitta alla guida. Le dimensioni fornite dal manuale per sviluppatori del VIVE, con le tolleranze adeguate, sono state utilizzate per modellare il prototipo. Dopo aver completato la stampa del modello e rimossi i supporti, si è potuto constatare che il prototipo fosse funzionante: è stato osservato che la slitta scorreva fluidamente all'interno dell'alloggiamento e si manteneva saldamente ancorata alla guida tramite l'utilizzo della vite di fissaggio, confermando che le misure di tolleranza scelte fossero adeguate. Dopo aver confermato il corretto funzionamento della slitta nel prototipo, si è quindi deciso di procedere con l'integrazione della slitta direttamente nel modello del reperto.

5.2.3 Stampa del reperto

Per modellare il meccanismo di ancoraggio è stato utilizzato Fusion 360, in modo da poter utilizzare strumenti specifici per la modellazione precisa di parti meccaniche. Tuttavia, per integrare il meccanismo di ancoraggio all'interno del modello del gatto, è stato preferito utilizzare Blender. Questa scelta è stata motivata dal fatto che il modello del gatto essendo stato realizzato in fotogrammetria presenta un elevato

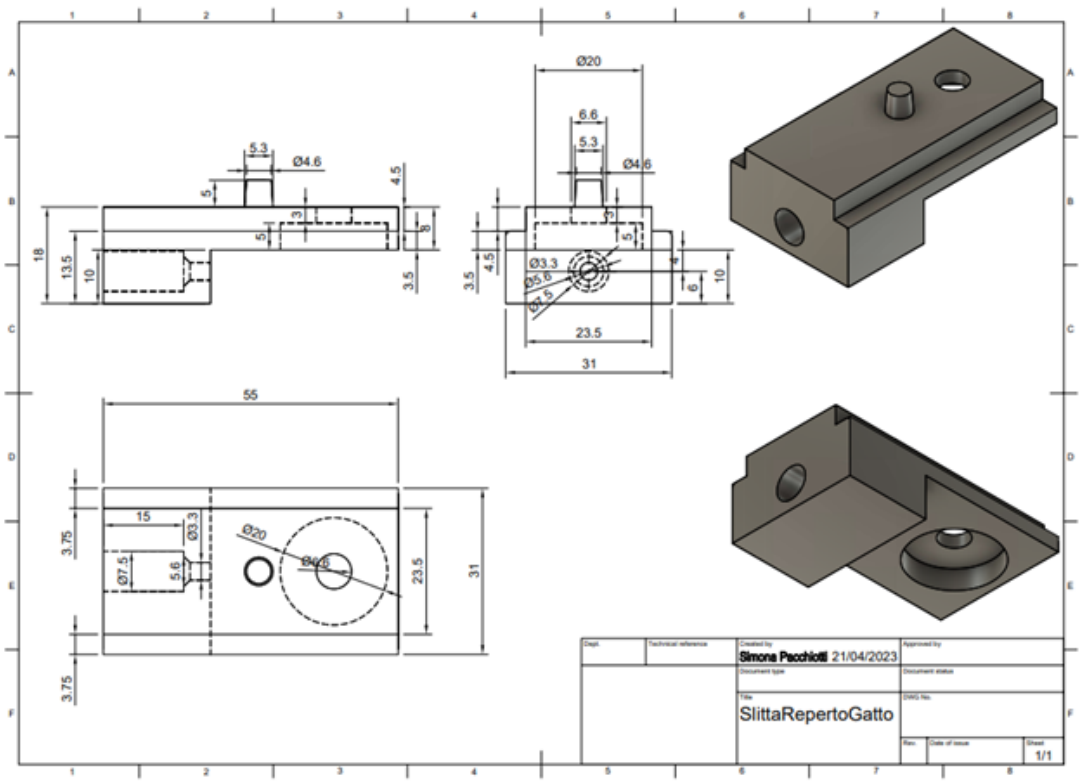

Figura 5.5: Slitta meccanismo ancoraggio

numero di facce sulla sua superficie, e una topologia molto complessa, rendendo la manipolazione e la modifica del modello più pesante e laborioso su Fusion 360.

L'utilizzo di entrambi i software, Fusion 360 e Blender, ha permesso di sfruttare le caratteristiche specifiche di ciascuno per ottenere un risultato preciso ed efficiente, combinando la modellazione meccanica dettagliata con la gestione della modellazione di superfici curve. E' stato deciso di iniziare con la realizzazione di una versione prototipale per poter testare varie caratteristiche prima di stamparne una versione definitiva. Le caratteristiche che si volevano testare erano le seguenti:

- la posizione ottimale per integrare il meccanismo di ancoraggio sul modello;
- la gestione del peso;
- La qualità della stampa per garantire la percezione dei dettagli desiderati.

Si è quindi proceduto all'integrazione di due diverse slitte in posizioni diverse al fine di valutare quale opzione fosse migliore in termini di praticità di manipolazione e qualità del tracciamento:

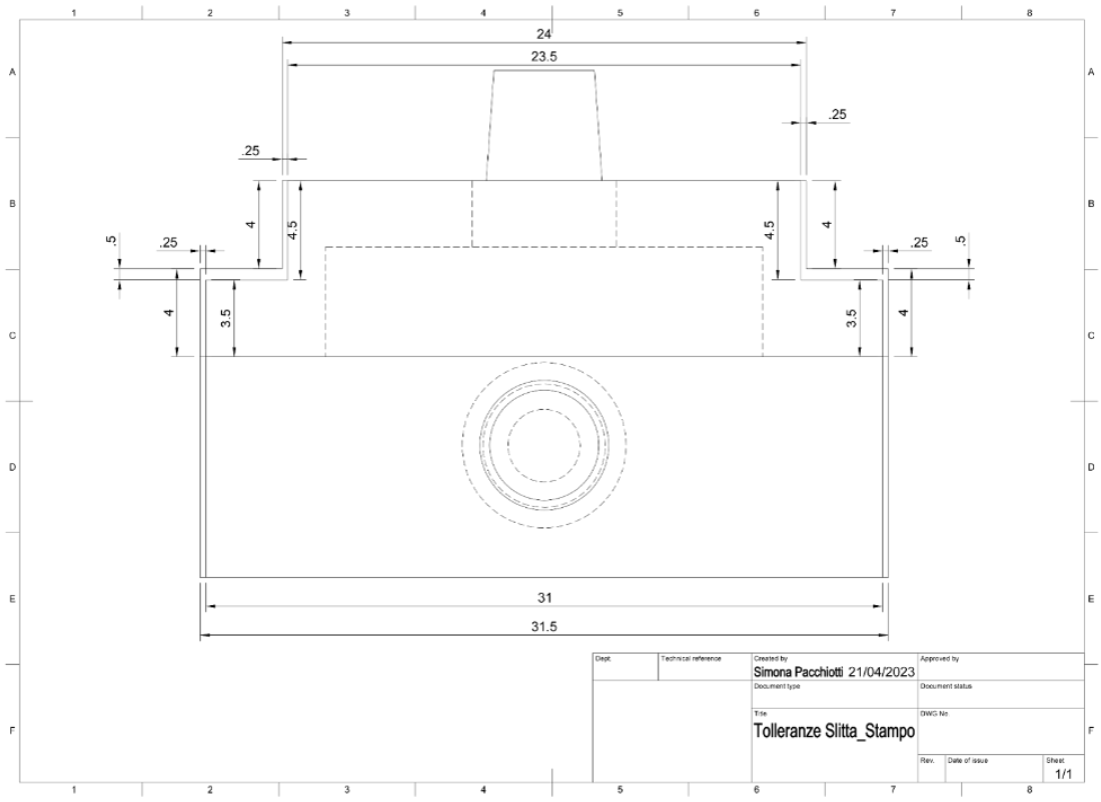

Figura 5.6: Tolleranze slitta/guida

- Una delle slitte è stata installata sotto la base del modello, ipotizzando che in questo modo il tracker potesse anche fungere da supporto per sostenere il reperto senza creare fastidi all'utente durante la manipolazione. Collocando il tracker sotto il reperto poggiato su una superficie piana, tuttavia si rischia di ostruire una parte significativa del campo visivo (FOV) del tracker, compromettendo così la precisione del tracciamento. Inoltre, esiste la possibilità che il tracker possa subire danni dalla pressione del peso del reperto stesso.

- L'altra slitta è stata posizionata alla base del reperto nella parte posteriore. Questa posizione potrebbe risultare meno pratica in termini di intralcio alla manipolazione, ma offre sicuramente un tracciamento migliore. La scelta di questa posizione si basa sul fatto che collocando il tracker nella parte posteriore del reperto, si evita di ostruire il campo visivo del tracker, consentendo così un tracciamento più preciso.

Per integrare i due sistemi slitta/guida è stato necessario appiattire la superficie del reperto nei punti specifici in cui si voleva applicare la guida. Questo è stato

fatto rimuovendo una porzione del modello tramite l'utilizzo di strumenti di modellazione, al fine di creare uno spazio adeguato per l'alloggiamento della guida. Successivamente, è stato utilizzato il software Fusion 360 per creare uno stampo della componente della guida. Lo stampo è stato quindi importato in Blender e applicato al modello tramite il modificatore booleano, consentendo di integrare la guida direttamente nel reperto. La componente slitta è stata poi sagomata, come si può vedere dall'immagine, sempre tramite l'utilizzo del modificatore booleaon, in modo tale che seguisse il profilo del modello e risultasse bene integrata.

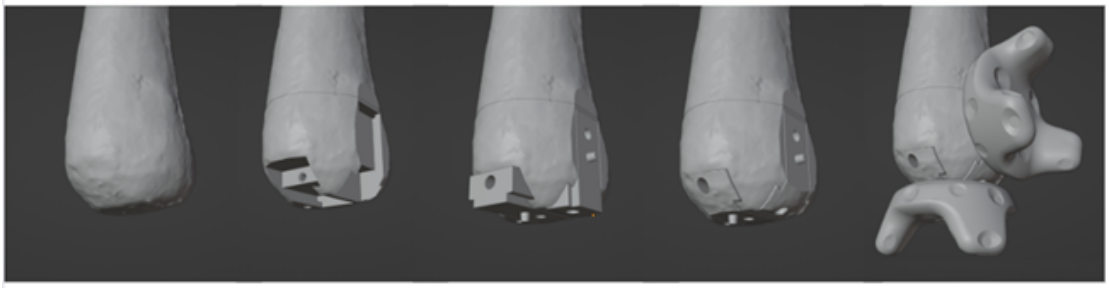

Figura 5.7: Processo integrazione slitta nel modello

Come accennato nell'introduzione e come visto da alcuni dei lavori inseriti nello stato dell'arte, per migliorare l'esperienza tattile e renderla più verosimile un'altra caratteristica aptica che si può tenere in considerazione e quella del peso, e di conseguenza della distribuzione del peso nell'oggetto. Si è quindi cercato di dare un peso più significativo all'oggetto stampato in modo da aumentare la materialità e mantenere la sospensione dell'incredulità dell'utente. Tenere in considerazione proprietà geometriche dell'oggetto per tecniche aptiche passive può aumentare l'immersione, tuttavia, è importante evitare di introdurre qualità indesiderate, come un peso eccessivo o fragilità, anche se ciò comporta un aumento della discrepanza con l'oggetto reale [12]. Pertanto, è stata presa la decisione di inserire un peso adeguato per aumentare la percezione di materialità senza compromettere la fluidità dell'interazione. Per aggiungere la componente del peso, sono state considerate diverse alternative, come l'utilizzo di materiali ad alta densità come piombo o ghisa. Tuttavia, a causa della forma irregolare del reperto, la sabbia è stata ritenuta la soluzione più appropriata. La sabbia offre flessibilità ed economicità, oltre a garantire una distribuzione uniforme del peso, contribuendo così a un'esperienza migliore e una maggiore stabilità. Questa soluzione è stata considerata ottimale in termini di distribuzione del peso rispetto all'utilizzo di pesi concentrati in punti specifici del reperto, che potrebbero causare squilibri nell'oggetto.

Si è quindi apportata una modifica al modello del reperto al fine di creare uno spazio cavo all'interno in cui inserire la sabbia. Questo è stato realizzato mediante un'estrusione della superficie del modello e posizionando lo spazio cavo all'interno

in modo che non si creasse un angolo superiore ai 55 gradi, come visibile nella foto, lasciando uno spessore del "bordo" di circa 3 mm. Questo approccio è stato adottato per evitare la necessità di utilizzare un supporto interno durante la fase di stampa, il quale sarebbe stato difficile da rimuovere in seguito.

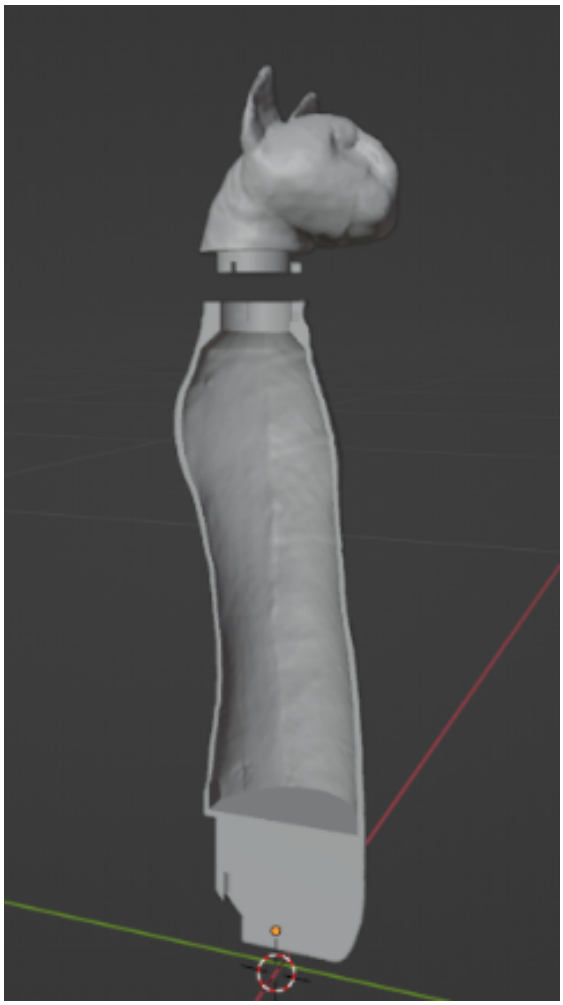

Figura 5.8: Interno modello

Per sigillare il modello una volta inserito il peso, è stato progettato un meccanismo di twist and lock su Fusion 360, che è stato successivamente integrato nel modello utilizzando Blender, come fatto per il meccanismo di slitta e guida. Ciò consente di effettuare diversi tentativi di riempimento prima di sigillare definitivamente il reperto.

Questo approccio consente una maggiore flessibilità nel riempimento del reperto con la sabbia, poiché è possibile aprire e chiudere il meccanismo di twist and lock per fare eventuali aggiustamenti o modifiche prima di completare la sigillatura

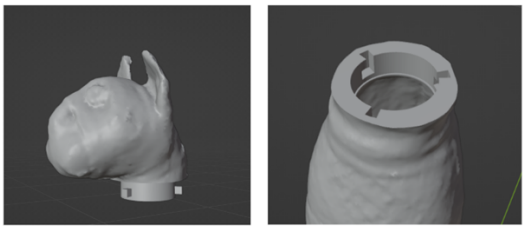

Figura 5.9: Twist and lock

finale. Il prototipo è quindi stato diviso in tre parti e stampato. Una volta stampato si è potuto constatare che il meccanismo di ancoraggio era funzionante e la qualità di stampa sufficiente a restituire tutti i dettagli tattili.Attraverso alcuni test, è stato scelto di utilizzare la slitta laterale come posizione preferita per il tracker, in quanto ha dimostrato una maggiore precisione nel tracciamento rispetto alla posizione sotto il reperto. Non sono stati riscontrati problemi di interazione da parte degli utenti legati alla posizione del tracker, ma è stato comunque deciso di sviluppare l'applicazione in modo che gli utenti fossero consapevoli della sua presenza.Grazie alla realtà virtuale, una volta indossato il visore, gli utenti possono osservare il reperto nella sua interezza senza la presenza visibile del tracker. Tuttavia, l'applicazione è stata progettata in modo che quando l'utente avvicina la mano alla posizione fisica del tracker, quest'ultimo diventa visibile in modo discreto attraverso una texture con opacità ridotta. Questo permette agli utenti di interagire con il reperto in modo naturale e consapevole della presenza del tracker, senza che ciò influisca negativamente sull'esperienza complessiva. Dopo aver analizzato i risultati del prototipo si è quindi realizzato un modello definitivo. Per la stampa è stato usato un*layer height* di 0.2 mm, *wall thickness* di 1.2 mm, *infill pattern* a zig zag con il 5 per cento di densità, 210° di temperatura e 70 mm/s di velocità. La stampa delle tre componenti, testa, corpo e slitta, è durata più di 10 ore.

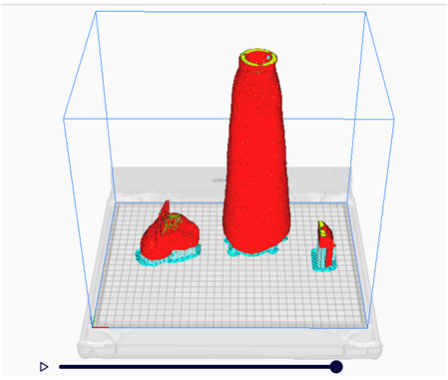

Figura 5.10: Slicing modello da stampare

5.2.4 Calibratore

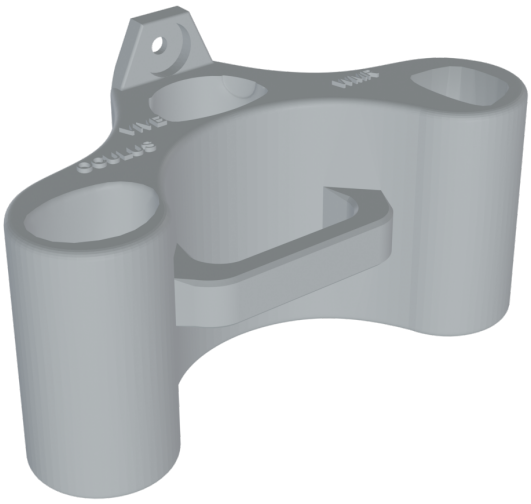

Figura 5.11: Modello del calibratore

Come accennato in precedenza per poter utilizzare insieme su Unity i Vive tracker con il visore Meta Quest 2 è necessario allineare i sistemi di riferimento dei due dispositivi. Questo viene realizzato eseguendo una calibrazione, durante la quale la posizione di uno dei dispositivi viene ricalcolata rispetto all'altro. Affinché la calibrazione sia precisa, è importante che entrambi i dispositivi siano posizionati in modo stabile e con posizioni note per la durata della procedura, e che la calibrazione possa essere eseguita rapidamente in modo coerente ogni volta che si desidera utilizzare l'applicazione. Pertanto è stato realizzato uno strumento tramite la stampa additiva per poter posizionare un controller del visore e un tracker della vive con posizione e orientamento predefiniti. Si è quindi modellato uno strumento che permette di avvitare il tracker sfruttando nuovamente il meccanismo di aggancio tramite vite e foro per perno stabilizzatore, e posizionare un controller del visore in un alloggiamento apposta. Lo strumento è stato modellato con l'uso di Fusion 360 e successivamente importato in Blender per aggiungere l'alloggiamento dedicato al controller. Per realizzare l'alloggiamento, è stato utilizzato il modificatore booleano in Blender utilizzando un modello CAD del controller con le adeguate tolleranze per l'inserimento.

Lo strumento è stato progettato con una forma ergonomica ma resistente, con una maniglia per consentire un facile spostamento È stato modellato tenendo presente che sia il controller che il tracker devono essere ben visibili dalle base stations

per poter eseguire con precisione la calibrazione. Per eseguire la calibrazione, si appoggia lo strumento del calibratore su una superficie piana, si posiziona il tracker sul perno stabilizzatore e lo si avvita al calibratore stesso. Successivamente, si inserisce il controller nell'apposito alloggiamento e si preme il pulsante sul controller per avviare la calibrazione.

Si consiglia di utilizzare un tracker apposito per la calibrazione durante l'esperienza principalmente per ragioni di velocità e comodità. è infatti risultato più comodo ed efficiente utilizzare un tracker per il reperto e uno per la calibrazione per evitare di dover avvitare e svitare il tracker prima sul calibratore e poi sul reperto. Eseguendo la calibrazione tutti i tracker che stanno venendo tracciati dalla base station si riposizionano allineando il sistema di riferimento a quello del meta quest 2. Utilizzando due tracker diversi è possibile anche eseguire nuovamente la calibrazione durante l'esperienza senza necessità di smontare e rimontare l'attrezzatura.

Il calibratore è stato progettato con alloggiamenti appositi per i controller di tre diversi visori per la VR, consentendo così la flessibilità di utilizzare lo stesso strumento per allineare i sistemi di riferimento di altri dispositivi, se necessario, in diverse situazioni, senza limitarsi esclusivamente all'ambito di questa tesi. Questo approccio mira a garantire la compatibilità e l'efficienza nell'utilizzo dello strumento di calibrazione in contesti diversi.

5.3 Avatar virtuale

Come accennato in precedenza, l'uso di un VH in un'applicazione VR può migliorare l'immersione, stimolare l'attenzione e fornire un efficace strumento di narrazione. Tuttavia, affinché l'utente si senta a proprio agio, l'avatar virtuale deve presentare un aspetto e dei comportamenti il più possibile realistici, al fine di evitare l'effetto *uncanny valley* che invece può causare disagio all'utente e compromettere l'esperienza complessiva.

Per creare un avatar virtuale che possa parlare in modo realistico è necessario sincronizzare due attività: il movimento delle labbra e la trasformazione del volto per supportare le espressioni facciali insieme all'audio contenente il discorso dell'avatar eseguito con la voce dell'avatar stesso. Entrambe le attività sono cruciali per presentare un discorso virtuale realistico, soprattutto quando si richiede un alto livello di espressività da parte del VH.

Uno dei metodi migliori per ottenere un'animazione credibile e simile a quella di un essere umano è utilizzare la *motion capture*. Con questo termine si intende un gruppo di tecnologie utilizzate per registrare e tracciare i movimenti di persone e oggetti, per realizzare animazioni realistiche. I movimenti e le azioni di un soggetto vengono registrate con precisione in tempo reale tramite l'utilizzo di dispositivi come sensori o camere. I dati di movimento che vengono catturati vengono poi

utilizzati per animare personaggi digitali per applicazioni in diversi campi. Tramite la motion capture è possibile quindi catturare movimenti realistici, restituendo con precisione elevata espressioni facciali, azioni complesse, gesti, movimenti e posture.

Nell'applicazione o*rig*inale le animazioni facciali della curatrice erano infatti state realizzate tramite motion capture. Tuttavia, seppur ottenendo un risultato estremamente realistico e naturale, comporta un investimento di tempo e risorse significativo, e presenta limitazioni in termini di flessibilità per quanto *rig*uarda la variazione dei contenuti. Anche una singola parola modificata richiede la registrazione e la sincronizzazione dell'intera sequenza di animazione.

Una soluzione alternativa e più flessibile è quella di utilizzare uno strumento di *lip syncing* automatico. Con *lip sync* si intende un termine tecnico per indicare la assegnazione del movimento labiale al rispettivo suono.

Un software di *lip syncing* automatico utilizza algoritmi e tecniche avanzate per sincronizzare automaticamente il movimento delle labbra di un personaggio virtuale con l'audio corrispondente. Questi software accettano in input degli audio che vengono analizzati per estrarne suoni individuali, chiamati fonemi, che vengono assegnati, utilizzando un apposito dizionario, al suono appropriato. I visemi vengono assegnati alle forme e ai movimenti labiali corrispondenti, e viene quindi generato il movimento delle labbra di un personaggio virtuale in sincronia con l'audio, mediante la deformazione di un modello 3D delle labbra o tramite l'animazione di un personaggio bidimensionale.

Nel caso di avatar utilizzati come narratori o guide virtuali, generalmente non è necessario che esprimano emozioni intense tramite le espressioni facciali, quindi per garantire all'utente un'esperienza piacevole non è necessario che l'espressività facciale sia estrema ma basta che sia sufficientemente realistica da accompagnarlo nella visita, è più importante che la narrazione sia interessante e ben strutturata [13].

Per velocizzare ulteriormente la produzione si può valutare l'utilizzo di un software Text-to-Speech (TTS) ovvero uno strumento che permette di generare automaticamente gli audio in base ad un input testuale.

Il software TTS è economico, facile da utilizzare e rapidamente adottabile, in quanto non richiede registrazioni vocali e il testo in input può essere modificato in qualsiasi momento, consentendo di modificare liberamente le narrazioni.

Tuttavia, poiché il parlato viene generato automaticamente, presenta ancora alcuni svantaggi, come l'espressione inadeguata delle emozioni, la mancanza di un linguaggio verbale spontaneo in termini di naturalezza e comprensibilità, la resa naturale del suono e altri ancora. È quindi preferibile se possibile utilizzare registrazioni vocali, poichè più naturali ed intellegibili, piacevoli da sentire e più comprensibili.

Per questa tesi, è stato quindi adottato un approccio che prevede l'utilizzo di uno strumento di *lip sync* per generare i movimenti facciali e sincronizzarli con

audio registrato, per offrire una maggiore flessibilità nella variazione dei contenuti e una resa più naturale del parlato. In questo modo è più semplice rivedere i testi narrati, fornendo la possibilità di registrare nuovamente le tracce audio per la narrazione senza la necessità di riacquisire il viso. Per realizzare il *lip sync* sono state quindi generate delle deformazioni del viso sul modello 3d della curatrice ed è stato utilizzato il software Salsa LipSync Suite per animarle.

Salsa fornisce un'approssimazione automatica e di alta qualità del *lip sync* per personaggi 2D e 3D, indipendentemente dalla lingua, offrendo un'elaborazione in tempo reale dei file audio di input. Tramite Salsa è anche possibile controllare il movimento degli occhi, delle palpebre e della testa, e di aggiungere espressioniemotive casuali come animazioni secondarie per fornire più varietà nell'animazione del viso e renderla più verosimile.

Per generare e sincronizzare il *lip sync* Salsa utilizza i visemi, che sono l'unità di base per la rappresentazione dei suoni vocali durante la produzione di un discorso.

Poiché l'analisi Salsa non rileva fonemi specifici, si basa sulle configurazioni dei visemi per produrre adeguati cambiamenti nell'animazione dinamica. L'analisi progressiva dell'ampiezza si basa sul principio che ampiezze maggiori producono più energia dinamica, il che richiede forme della bocca più grandi per produrre tale energia dinamica. I fonemi sono le unità di base per il significato del linguaggio, mentre i visemi sono le unità di base per la rappresentazione visiva del parlato. I fonemi sono le unità più piccole di suoni distintivi all'interno di una lingua. Sono considerati le unità fondamentali che distinguono un significato da un altro in un determinato contesto linguistico. I visemi, d'altra parte, sono le unità di base per la rappresentazione visiva dei suoni durante la produzione del discorso. Rappresentano configurazioni specifiche della bocca, delle labbra e della lingua che si verificano durante la pronuncia di determinati suoni o fonemi. I visemi sono spesso associati a specifici suoni della lingua parlata, ad esempio, "b", "m" e "p" possono essere associati a un visema chiamato "labiale", mentre "f" e "v" possono essere associati a un visema chiamato "labiodentale". In questo modo è possibile utilizzare un numero limitato di visemi per riprodurre realisticamente il movimento facciale di un avatar durante un discorso.

Salsa analizza l'audio in entrata, riconosce i visemi necessari e li associa in tempo reale alla corrispondente forma del volto. È stato quindi necessario realizzare i visemi necessari sul viso del modello 3D della curatrice.

Il modello della curatrice è stato creato utilizzando il modello facciale generato per l'applicazione precedente, dal momento che era estremamente realistico e ben fatto. Successivamente, sono stati aggiunti i modelli del corpo, degli accessori e dei capelli utilizzando modelli preesistenti provenienti da Character Creator 3 di Reallusion. Questo software fornisce virtual human realistici e di alta qualità che sono compatibili con gli altri strumenti utilizzati nella pipeline. In particolare, è stato utilizzato un add-on gratuito di CC3 su Unity per facilitare l'utilizzo

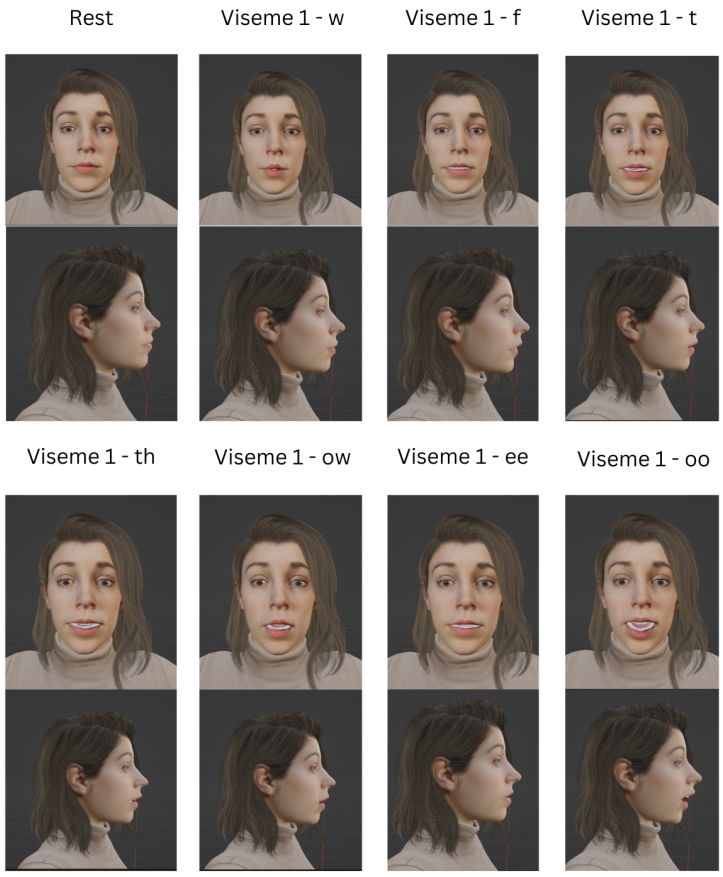

Figura 5.12: Visemi

dei materiali e l'applicazione di texture realistiche. Questi materiali sono stati appositamente progettati per essere utilizzati con la render pipeline di illuminazione HDRP su Unity, che è stata utilizzata nell'applicazione.

Successivamente, i modelli sono stati assemblati su Blender, e utilizzando l'addon *rig*ify, il modello è stato collegato a un'armatura attraverso il processo di *rig*ging.

Figura 5.13: Modello curatrice virtuale

L'armatura è stata poi resa *game ready*, tramite l'add on Expy kit, così da poter essere utilizzata in modo ottimale una volta importato tutto su Unity. Il rig*ging* è il processo di collegare una struttura scheletrica virtuale, nota come *rig*, a un modello 3D per consentire la deformazione e l'animazione del personaggio, è composta da ossa, articolazioni e controlli, che permette di controllare e animare il modello in modo realistico. La *rig* di *rig*ify permette una manipolazione dell'espressività facciale molto precisa, grazie all'utilizzo di più di 90 ossa per deformare la mesh del viso, sono state quindi generate le *shape key* per animare il movimento delle labbra e della bocca manipolando la rig.

Sulla documentazione di Salsa vengono presentate le raccomandazioni su come creare i visemi per il *lip sync*, in particolare si consiglia di non limitarsi a variare progressivamente l'apertura delle labbra ma di variare anche la definizione della forma delle labbra stesse. Questo approccio permette di ottenere un movimento realistico delle labbra in tutto lo spettro delle espressioni. Viene suggerita una combinazione di visemi standard che può essere utilizzata per ottenere un'ampia gamma di espressioni realistiche per il *lip sync*. Nel modello della curatrice, questi visemi sono stati ricreati tramite la manipolazione della *rig* e sono stati salvati come *shape key* per poter essere utilizzati dinamicamente su Unity tramite il sistema Salsa per generare il *lip sync*.

Le *shape keys*, note anche come *morph target* o *blend shape*, sono una tecnica utilizzata nell'animazione 3D per deformare la geometria di un modello in base a una serie di forme di riferimento predefinite. In sostanza, una *shape key* consente

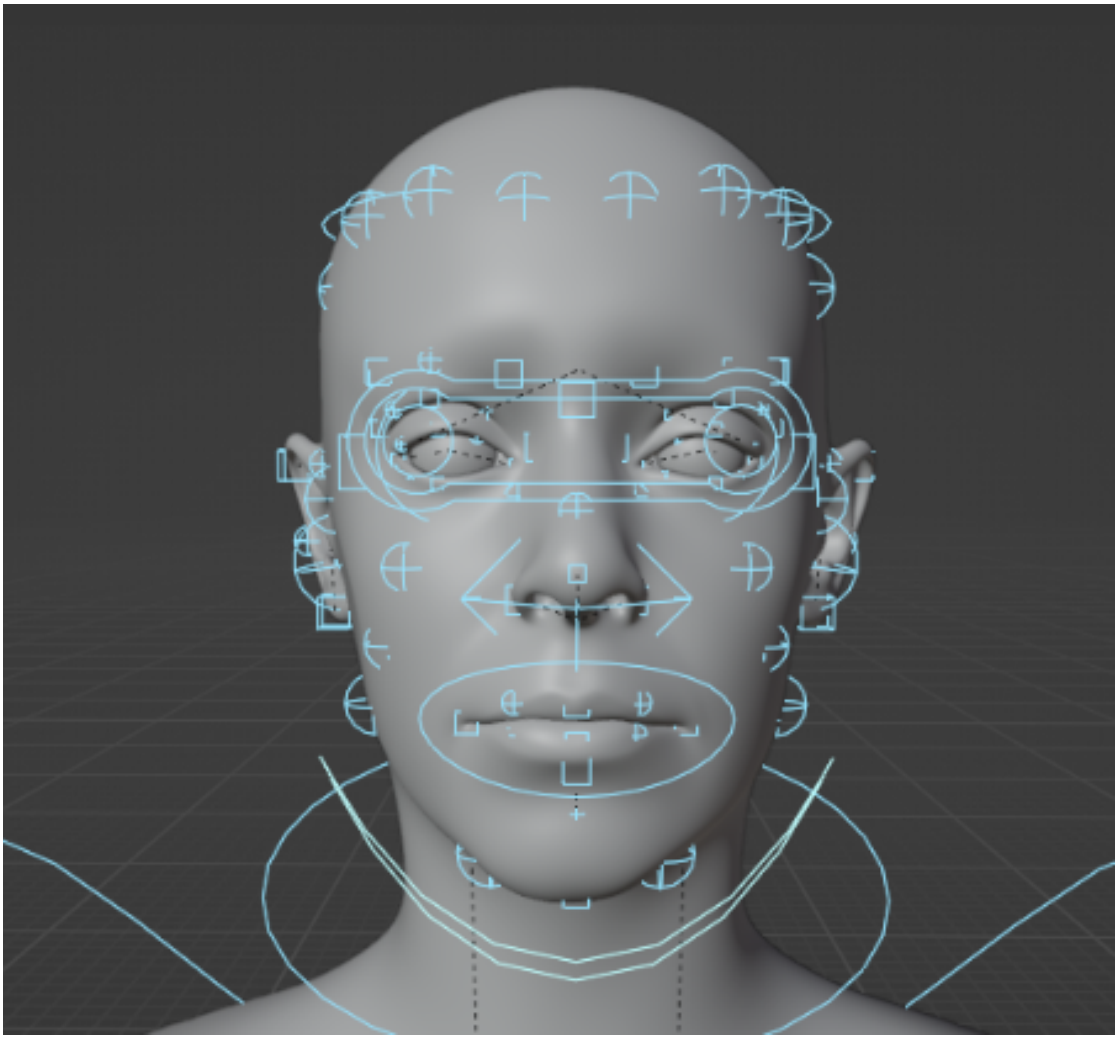

Figura 5.14: *rig*

di modificare la forma di un oggetto modificando le sue coordinate geometriche, come la posizione dei vertici, la scala o la rotazione.

Su Unity, Salsa utilizza le *shape key* per manipolare il movimento labiale del modello in base all'audio che viene dato in ingresso.

Successivamente alla creazione delle *shape key*, il modello completo viene esportato in formato .fbx e importato su Unity. Per utilizzare Salsa è necessario prima assegnare il component "Salsa" all'avatar virtuale e procedere con la configurazione. È necessario assegnare una componente audio source in cui verranno poi inseriti le tracce audio della narrazione e un componente "Queue processor" che gestisce il funzionamento del sistema. Nella sezione "Dynamics" le impostazioni devono essere configurate in base alle esigenze e alla variazione dell'audio, specificando

come analizzare la distribuzione dell'intervallo valido dei dati analizzati, ovvero tra [0...1]. Assegnando i giusti valori al limite superiore ed inferiore, i valori al di sotto e al di sopra di tali limiti vengono rimossi e i valori rimanenti vengono scalati linearmente all'interno dell'intervallo [0 ...1].

Per assegnare le *shape key*, si creano nuovi componenti "Viseme" per ogni *shape key* nella sezione "Viseme config" in cui si inserisce la *shape key* corrispondente. Per ogni Viseme si possono configurare alcuni aspetti come l'easing, il timing o il valore massimo o minimo di variazione della deformazione.

Una volta eseguita la configurazione iniziale se viene fornito un audio in input, precedentemente registrato, si otterrà già una sincronizzazione dei movimenti labiali. Per aumentare ulteriormente il realismo, è possibile impostare ulteriori caratteristiche.

Aggiungendo la componente "Eyes" è possibile aggiungere un movimento casuale degli occhi che rende il personaggio molto più naturale, creando dei micro-movimenti che rendono il personaggio meno statico e meno robotico. Si possono controllare i movimenti degli occhi tramite *shape key* come per i movimenti labiali oppure si può usare la rotazione delle ossa nell'armatura. Si sono quindi assegnate nella sezione "Eye configuration" le ossa dell'armatura che controllano il movimento degli occhi del modello specificando i gradi di movimento desiderati sia in direzione verticale che orizzontale. Tramite salsa è anche possibile assegnare un target al movimento agli occhi e alla testa in modo che la curatrice si rivolga direttamente all'utente durante l'esperienza. Il contatto visivo aiuta ad aumentare l'immersione, il coinvolgimento e la risposta emotiva dell'utente. Ruotando la testa e gli occhi dell'avatar in modo tale che sembri stiano effettivamente interagendo con l'utente, si può intensificare il senso di presenza e coinvolgimento. Inoltre, il contatto visivo con un avatar può suscitare la sensazione di essere osservati, creando l'illusione che l'avatar stia reagendo in modo diretto e autentico, come se fosse un vero interlocutore. Questo livello di coinvolgimento visivo può rendere l'esperienza ancora più memorabile e coinvolgente per l'utente.

Un'ulteriore componente che si può aggiungere è quella dell'"EmoteR" per aggiungere variazioni nell'espressività facciale. Attraverso l'utilizzo di *shape keys*, è possibile creare animazioni secondarie che complementano il *lip sync* e arricchiscono il movimento facciale dell'avatar. Come per i visemi si crea un nuovo "Emote" per ogni espressione aggiuntiva e si assegna la *shape key* corrispondente, come ad esempio movimenti delle sopracciglia e del naso. È possibile specificare se l'"Emote" verrà utilizzato per enfatizzare il movimento delle labbra, se verrà inserito casualmente durante la narrazione oppure una combinazione delle due opzioni.

La componente "EmoteR" viene associata nel component "Salsa" e viene assegnata una soglia di probabilità per attivare le deformazioni.

Le animazioni del corpo della curatrice sono state create utilizzando Blender.

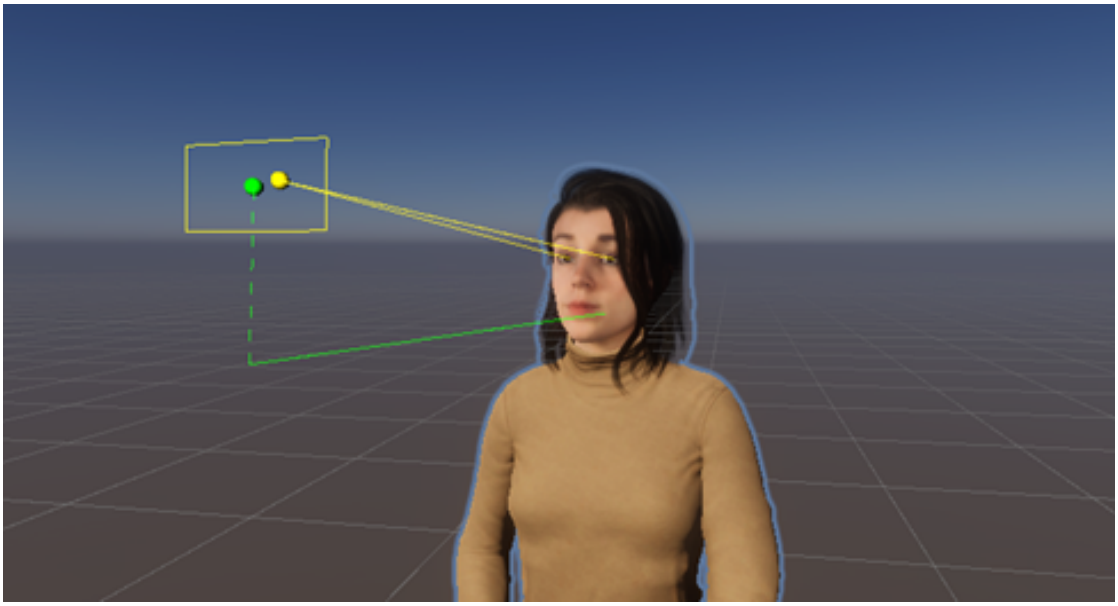

Figura 5.15: Movimento occhi curatrice virtuale

Sono state sviluppate due animazioni distinte: una per rappresentare la curatrice durante il discorso e un'altra per rappresentarla durante i momenti di silenzio. La curatrice è posizionata dietro una scrivania e le animazioni sono state realizzate in modo da mantenere una presenza discreta, lasciando l'attenzione principalmente sulle informazioni e sul reperto anziché sulla curatrice stessa. Tuttavia, sono state implementate dei movimenti della testa per enfatizzare la narrazione, conferendo maggiore enfasi e realismo alla presentazione.

Per gestire le animazioni su Unity, è stato utilizzato un "Animator controller", un componente software che permette di gestire le transizioni tra diverse animazioni in base a determinati t*rig*ger o condizioni. Attraverso l'utilizzo di uno script dedicato, l'Animator controller viene controllato in modo da attivare l'animazione corretta in sincronia con la riproduzione dell'"Audio source" associato al discorso della curatrice, animando il corpo in modo adeguatamente sincronizzato con il contenuto verbale.

Capitolo 6

Conclusioni

Questo percorso di tesi ha portato alla realizzazione di un'applicazione che propone un approccio alternativo alla fruizione di contenuti museali tramite la VR. Grazie a questa tecnologia, gli utenti hanno la possibilità di interagire in modo diretto e tangibile con la replica realistica di un reperto, mentre vengono accompagnati da una curatrice virtuale all'interno di un ambiente culturale immersivo, beneficiando di una narrazione coinvolgente e di un elevato livello di realismo. In particolare attraverso questa pipeline è stata creata un'applicazione che può essere facilmente estesa alla fruizione di nuovi reperti aggiungendo contenuti aggiuntivi. Questa flessibilità rappresenta un punto di forza dell'applicazione, che può adattarsi e crescere nel tempo per offrire sempre nuove esperienze culturali.

Essendo la VR una tecnologia relativamente recente e in continua evoluzione c'è ancora spazio per miglioramenti e sinergie tra le diverse tecnologie per ottimizzare la calibrazione e migliorare l'usabilità generale dell'applicazione.

Con la possibilità di utilizzare potenziali nuove tecnologie che si integrano più facilmente tra di loro, si potrebbe semplificare notevolmente il processo di calibrazione, consentendo agli utenti di godere di un'esperienza più fluida e intuitiva. Un'interazione più veloce e efficiente tra sensori di tracciamento e gli altri dispositivi potrebbe ridurre la complessità delle configurazioni iniziali e offrire un'esperienza utente più accessibile e gratificante.

Durante lo sviluppo, sono state create tre diverse modalità di interazione, ognuna con approcci unici per coinvolgere gli utenti. Tuttavia, al fine di valutare in modo accurato l'efficacia e l'usabilità di queste interfacce, sono necessari ulteriori test utente. Questi test potrebbero fornire *feedback* per identificare punti di forza, criticità e aree di miglioramento delle interfacce, al fine di rendere l'esperienza complessiva ancora più coinvolgente, intuitiva e personalizzata per gli utenti.

Con questo progetto si vuole proporre un sistema per consentire agli utenti di immergersi in un ambiente virtuale che combina accuratezza visiva e uditiva con la sensazione tattile di manipolare e interagire con reperti reali.

L'obiettivo finale è offrire un'esperienza culturale virtuale di alta qualità, in grado di stimolare l'interesse, la curiosità e l'immersione degli utenti nel mondo culturale.

Bibliografia

[1] Simone Restivo. «Realtà virtuale per esperienze di visita immersive ed interattive». In: 2022 (cit. alle pp. 1, 4).

[2] Augenti Andrea, Christian Greco , Maurizio Ferraris. «Archeologia Invisibile». In: 2019 (cit. alle pp. 2, 3, 43).

[3] Daniele Duranti, Davide Spallazzo, Raffaella Trocchianesi et al. «Tangible interaction in museums and temporary exhibitions: embedding and embodying the intangible values of cultural heritage.» In: 2016 (cit. a p. 5).

[4] Paul Milgram e Fumio Kishino. «A taxonomy of mixed reality visual displays». In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* (1994) (cit. a p. 6).

[5] Paul Wilson, Janet Stott, Jason Warnett, Alex Attridge, M. Smith e Mark Williams. «Evaluation of Touchable 3D-Printed Replicas in Museums». In: *Curator: The Museum Journal* 60 (gen. 2018) (cit. alle pp. 7, 8).

[6] Catriona Cooper. «You can handle it: 3D printing for museums». In: *Advances in Archaeological Practice* 7.4 (2019) (cit. a p. 8).

[7] Tasia L. Williams. «More than just a novelty? Museum visitor interactions with 3D printed artifacts». In: University of Washington, 2017 (cit. a p. 8).

[8] Alberto Gallace e Charles Spence. *In touch with the future: The sense of touch from cognitive neuroscience to virtual reality*. OUP Oxford, 2014 (cit. a p. 10).

[9] Francesco Mantovani. «Passive Haptic Feedback for Object Manipulation in Virtual Reality». In: 2019 (cit. alle pp. 10, 11, 17).

[10] Michael White, James Gain, Ulysse Vimont e Daniel Lochner. «The case for haptic props: Shape, weight and vibro-tactile feedback». In: *Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction and Games*. 2019, pp. 1–10 (cit. a p. 10).

[11] Niels Christian Nilsson, André Zenner e Adalberto L Simeone. «Propping up virtual reality with haptic proxies». In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 41.5 (2021), pp. 104–112 (cit. a p. 11).

[12] Adalberto L Simeone, Eduardo Velloso e Hans Gellersen. «Substitutional reality: Using the physical environment to design virtual reality experiences». In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2015, pp. 3307–3316 (cit. alle pp. 11, 57).

[13] Ana Martí Testón e Adolfo Muñoz. «Digital Avatars as storytellers to produce natural and humanized museum visits with Extended Reality». In: feb. 2021 (cit. alle pp. 12, 62).

[14] Stella Sylaiou, Vlasios Kasapakis, Damianos Gavalas e Elena Dzardanova. «Avatars as storytellers: Affective narratives in virtual museums». In: *Personal and Ubiquitous Computing* (2020) (cit. a p. 12).

[15] Kira Eghbal-Azar, Martin Merkt, Julia Bahnmueller e Stephan Schwan. «Use of digital guides in museum galleries: Determinants of information selection». In: *Computers in Human Behavior* (2016) (cit. a p. 12).

[16] Effie Karuzaki et al. «Realistic virtual humans for cultural heritage applications». In: *Heritage* (2021) (cit. alle pp. 13, 27).

[17] Daniel Pletinckx. *Virtex: a multisensory approach for exhibiting valuable objects*. interactive institute AB, 2007 (cit. a p. 14).

[18] Hunter G Hoffman. «Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments». In: *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium (Cat. No. 98CB36180)*. IEEE. 1998 (cit. a p. 16).

[19] Gianpaolo Palma, Sara Perry e Paolo Cignoni. «Augmented virtuality using touch-sensitive 3D-printed objects». In: *Remote Sensing* 13.11 (2021), p. 2186 (cit. a p. 19).

[20] Jocelyn Spence, Dimitrios Paris Darzentas, Yitong Huang, Harriet R Cameron, Eleanor Beestin e Steve Benford. «VRtefacts: Performative substitutional reality with museum objects». In: *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*. 2020, pp. 627–640 (cit. a p. 20).

[21] Wan-Ting Hsu e I-Chen Lin. «Associating Real Objects with Virtual Models for VR Interaction». In: *SIGGRAPH Asia 2021 Posters*. 2021, pp. 1–2 (cit. a p. 21).

[22] Cathy Mengying Fang, Ryo Suzuki e Daniel Leithinger. «VR Haptics at Home: Repurposing Everyday Objects and Environment for Casual and On-Demand VR Haptic Experiences». In: *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2023, pp. 1–7 (cit. a p. 22).

[23] Lila Bozgeyikli e Evren Bozgeyikli. «Tangiball: Dynamic embodied tangible interaction with a ball in virtual reality». In: *Companion Publication of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference 2019 Companion*. 2019, pp. 135–140 (cit. a p. 23).

[24] Ryota Yoshimoto e Mariko Sasakura. «Using real objects for interaction in virtual reality». In: *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*. IEEE. 2017 (cit. a p. 24).

[25] Pablo Figueroa, Rongkai Guo, Kazuki Takashima e Benjamin Weyers. «Escape room in mixed reality: 10th annual 3DUI contest». In: *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2019 (cit. a p. 25).

[26] *Hold the World*. URL: `https://www.oculus.com/experiences/rift/2331434793563555/` (cit. a p. 26).

[27] Ana Martı Testón e Adolfo Muñoz. «Digital avatars as humanized museum guides in the convergence of extended reality». In: *Proceedings of the MW21 Conference*. 2021 (cit. a p. 28).

[28] *Assets Biblioteca*. URL: `https://aikoshinohara.gumroad.com/l/AikoShinohara` (cit. a p. 41).

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, il Professor Fabrizio Lamberti, per avermi dato la possibilità di lavorare a questo progetto e per tutto il supporto che mi ha fornito in questi mesi.

Desidero esprimere la mia gratitudine alla Professoressa Roberta Spallone, i cui feedback sono stati utili per la realizzazione di questo progetto.

Ringrazio Davide Calandra, Gabriele Pratticò e Alberto Cannavò per i preziosi consigli e per avermi accompagnato lungo tutto il percorso. Non posso dimenticare Francesca Ronco per il suo sostegno e l'aiuto che mi ha fornito.

Un ringraziamento speciale va a tutti i colleghi del Lab 2, per i suggerimenti e per il tempo trascorso insieme.

Un grazie particolare a Nicola Retta, mio compagno di tesi, senza il quale non avrei mai potuto completare questo percorso, e a Gio perchè senza di lui nessuno dei due avrebbe portato a termine questa tesi.

Desidero ringraziare la mia famiglia, i miei genitori, mio fratello e mia sorella, e mia nonna per essere stati al mio fianco in ogni momento.

A Dany, Fede, Gemma e Nova, con cui condivido una lunga storia, non avrei mai potuto arrivare dove sono ora senza di voi.

Voglio inoltre esprimere la mia gratitudine a tutte le Compenetrazioni per il loro sostegno e l'amicizia dimostrati in tutti questi anni, e per aver scelto il peggior nome di gruppo da citare in una tesi.