UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN "E. VITTORIA"

CORSO DI LAUREA IN

Design per l'Innovazione Digitale

TITOLO DELLA TESI

VidMentis

Progettazione di un dispositivo aptico per l'esplorazione esperienziale dell'arte in realtà virtuale

Laureando/a

Nome Catia Pedace

Firma Catia Pedace

Relatore

Nome Daniele Rossi

Firma

Se presente eventuale Correlatore indicarne nominativo/i

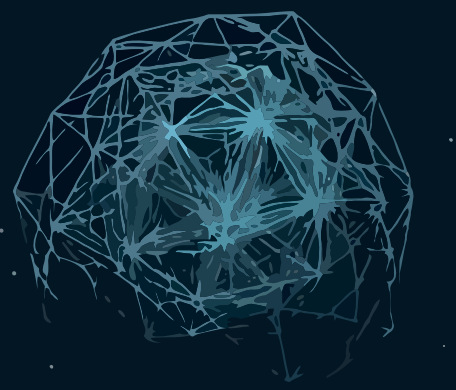
Francesco Pezzuoli

ANNO ACCADEMICO

24/25

Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

Corso di Laurea Magistrale in
Design per l'Innovazione Digitale LM-12



VidMentis

Progettazione di un dispositivo aptico per l'esplorazione esperienziale dell'arte in realtà virtuale

Relatore: Daniele Rossi **Correlatore:** Francesco Pezzuoli

Laureanda: Catia Pedace

A Paolo,
per il sostegno incondizionato,
la pazienza nei momenti difficili e i
sogni che continuiamo a condividere

INDICE

INTRODUZIONE

1 CONTESTO TEORICO E PROGETTUALE
1.1 Normative, linee guida e standard europei e nazionali
1.2 Le disabilità visive: ipovisione e cecità
1.3 La realtà virtuale: definizioni e ambiti di applicazione

2 STATO DELL'ARTE SULLA VR ACCESSIBILE PER NON VEDENTI
2.1 Tecnologie assistive nella VR per non vedenti
2.2 Esperienze e progetti esistenti di VR accessibile
2.3 Interazione uomo-computer in chiave inclusiva

3 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE
3.1 Musei e VR: accessibilità attuale
3.2 Barriere comuni nelle esperienze visive
3.3 Elementi di successo e criticità rilevate

4 DALL'ANALISI AL PROGETTO
4.1 Requisiti e bisogni emersi
4.2 Obiettivi del progetto e concept
4.3 L'idea: esplorare l'arte tramite un dispositivo aptico in VR
4.4. Scelte tecnologiche, approccio progettuale e inclusività come fondamento

5 VIDMENTIS
5.1 Architettura generale del sistema
5.2 Ambiente virtuale e spazio dell’esperienza
5.3 Pipeline digitale dell’opera (Digital Twin)
5.4 Sistema di interazione utente-opera
5.5 Sistema di feedback multisensoriale

6 PROGETTAZIONE DEL DISPOSITIVO APTICO
6.1 Principi progettuali del dispositivo
6.2 Architettura hardware del dispositivo
6.3 Integrazione software-hardware e comunicazione con Unity
6.4 Processo di sviluppo e prototipazione

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

APPENDICI
Schemi progettuali
Dettagli tecnici
Screenshot e wireframe

INTRODUZIONE

E' di tutta evidenza che, negli ultimi anni, la realtà virtuale (VR) si è affermata come uno degli strumenti più promettenti negli attuali contesti di innovazione digitale: dall'intrattenimento all'istruzione, alla formazione professionale e culturale; una prassi tecnologica diventata sempre più alla portata di (quasi) tutti per le più disparate esperienze.
Il quasi è d'obbligo, atteso che - nonostante l'elevato potenziale - tale risorsa è prevalentemente strutturata ed indirizzata a utenti normodotati lasciando in secondo piano le necessità di chi, per deficit visivi, rimane escluso da tale modalità di interazione.
Da questa consolidata consapevolezza, trae spunto ed impulso lo studio che va a presentarsi, inerente alla possibile e realizzabile inclusività mediante il ricorso alla realtà virtuale, con particolare riferimento ai non vedenti o ipovedenti.
Più nello specifico, si ritiene che sia veramente progettabile un'esperienza culturale immersiva fatta di voce, suono e tatto che consenta ad utenti diversamente abili di godere dell'arte, risultando questi spesso esclusi dalla possibilità di fruizione degli ambienti museali ed espositivi in genere.
Pensiamo al (certamente lecito) divieto esistente nelle gallerie di toccare, sfiorare, le opere esposte al fine di evitare danni di qualsiasi genere, non ultimo quello derivante dalle alterazioni dovute alla contaminazione delle superfici o alla normale usura; laddove la finalità primaria è quella di conciliare la fruizione e la tutela del manufatto, risulta indispensabile per chi vede principalmente - ma non esclusivamente, attraverso il tatto - il ricorso a percorsi espositivi che rimandano ad una esperienza sensorialmente più coinvolgente e duttile, adattandosi alle materiali esigenze dello specifico (e speciale) utilizzatore.
Pertanto, l'obiettivo di questo studio è quello di contribuire alla discussione e alla progettazione di esperienze di realtà virtuale più inclusive, attraverso un'applicazione che consenta di fruire di un'opera d'arte attraverso un dispositivo aptico che trasmetta stimoli tattili nella contestualizzazione di un ambiente virtuale. L'attenzione di questo progetto si concentra sulla sua concettualizzazione basata sull'inserimento di riferimenti teorici, esempi preesistenti e scelte progettuali coerenti con la sensibilità inclusiva.
Il processo in questione è esplorativo e orientato alla progettazione: in primo luogo, si esplorano le problematiche in questione, si analizzano le critiche canoniche riscontrate in contesti digitali e museali e poi si traduce l'esigenza in un sistema materiale e intrinsecamente fattibile che possa davvero aprire la strada a nuove forme di accessibilità e partecipazione.
L'obiettivo non è quello di fornire una soluzione definitiva, ma piuttosto di sviluppare una prassi coerente e sensibile che dimostri come la tecnologia possa facilmente integrarsi con i principi di inclusione applicati all'arte per renderla accessibile a tutti.
Come scrive Agamben, «la sensazione è questo medio, in cui la carne e il tangibile sono a contatto in uno stesso luogo, che a ragione Aristotele definisce primo, perché non è anteriore ma, piuttosto, immanente alla dualità fra soggetto e oggetto, in cui si scinde la rappresentazione che cerca di darne

conto. Il contatto è, in questo senso, un'autoaffezione, un agire che patisce se stesso e un patire che agisce su di se» : se l'autoaffezione è riflesso, considerazione per se stessi, il tatto non è certo l'ultimo dei sensi perché costituirebbe un medio che non è meramente tale, se «... nel toccare il sensorio e il tangibile coincidono nella potenza di toccare, così nel pensiero l'intelletto pensa se stesso attraverso la sua potenza di pensare [...] e può pensare se stesso» : se l'autoaffezione è percezione e amore di e per se stessi e il pensiero intellettivo è, nel nostro caso, strumento di conoscenza della realtà sensibile, l'interfaccia tecnologica è l'ulteriore secondo medium in ausilio alla facoltà sensoriale.
L'aspirazione all'inclusione, connessa alla tecnologia digitale, è uno straordinario mix laddove si possono concretizzare accessibilità e opportunità di comunicazione, forieri di apprendimento e diffusione culturale, con l'eliminazione delle preclusioni e con l'evidente garanzia di un diritto che non può e non deve essere negato, stante le condizioni esistenti (o realizzabili) per garantire opportunità a tutte le persone, indipendentemente dalle capacità sensoriali, fisiche e cognitive.
Normalmente, la realtà virtuale è un'esperienza immersiva pensata per coinvolgere i sensi e, tra questi, il principale (nella maggior parte delle esperienze) è la vista e può considerarsi - per la maggior parte degli utenti - un di più: al contrario, per la stragrande maggioranza delle persone con disabilità visive diventa una straordinaria opportunità con conseguente soddisfazione e crescita culturale, educativa ed emotiva.
In tale senso, l'inclusione richiede la rivisitazione della relazione fra uomo e macchina in un'ottica di coinvolgimento dei sensi attraverso, principalmente, strumenti uditivi, tattili e motori. In questa prospettiva, la disponibilità alla collaborazione del Museo Tattile Statale Omero di Ancona rappresenta un riferimento concreto per collegare la riflessione sull'inclusione a pratiche culturali già orientate all'accessibilità.
Ovviamente, la denominazione della particolare struttura museale appena richiamata, Omero, non è casuale: il cantore (probabilmente, il compilatore, il redattore) dell'Iliade e dell'Odissea del VIII - VII sec. a.C., ci è stato tramandato dalle fonti storiografiche quale cieco: lo stesso nome è una «parola che significa ostaggio» : è probabile che si tratti di un archetipo connesso alla concezione antica che la cecità si associasse alla capacità profetica - una spiccata propensione alla visione interiore quasi a controbilanciare la menomazione fisica (emblematico il ricorso, proprio nell'Odissea, alla figura dell'indovino Tiresia) oppure perchè «la sofferenza (pathos) possa produrre conoscenza (mathos) [quale] convinzione che affiora ripetutamente in numerosi testi del mondo greco arcaico e classico» : per quanto di interesse per questo studio, l'implementazione della capacità sensoriale attraverso la realtà virtuale è una sfida che dà la possibilità, concreta, di ridurre al minimo il disagio e amplificare la capacità percettiva.
Pertanto, creare esperienze museali di realtà virtuale accessibili a persone non vedenti e ipovedenti non è solo una sfida progettuale, ma un'apertura e una responsabilità sociale, laddove tali realtà impongono che l'arte, la conoscenza e la bellezza siano accessibili a chiunque e, pertanto, la tecnologia dovrebbe offrire un mezzo di accesso a chiunque.
A maggior ragione se l'arte è da sempre uno dei linguaggi più importanti attraverso cui gli esseri umani esprimono la loro comprensione del mondo che li circonda, i loro sentimenti, i loro ricordi personali e collettivi. Perciò diventa centrale l'immagine ossia «il porre-in-immagine, non vale qui quale indumentum che nasconde o fraintende il reale, ma come la rappresentazione verace della realtà del simbolo. Il

realismo [...] vuole esprimere la fede nella realtà dell'evento che in essa si dipinge [laddove] l'immagine come illusione, fantasma o travestimento del significato vero, da cui quest'ultimo deve essere spogliato» : una rappresentazione dell'immagine - simbolo il più possibile percepita attraverso la possibilità concreta di visitare un museo, sostare di fronte a un'opera, osservarla da vicino, coglierne i particolari.
Tuttavia, nonostante i progressi compiuti verso l'accesso alla cultura, gran parte della storia dell'arte è accessibile solo a chi può vederla. Per i non vedenti o gli ipovedenti, l'esperienza artistica è altrimenti notevolmente ridotta o inibita. Laddove esistono buone pratiche, emergono il braille, le audioguide e le riproduzioni tattili, tuttavia, nella maggior parte dei casi, l'accesso all'arte è limitato all'apprezzamento visivo.
L'esperienza del cennato Museo Tattile Statale Omero di Ancona costituisce un riferimento significativo, perché mostra come l'esperienza estetica possa essere costruita anche attraverso modalità non visive.
Mentre le domande su un'esperienza di realtà virtuale accessibile per persone non vedenti e ipovedenti sarebbero normalmente di natura tecnica e funzionale, qui sono più di natura culturale. Pertanto, la domanda guida non è tanto una risposta letterale, quanto qualcosa su cui riflettere: come viene apprezzata l'arte quando la vista non è un'opzione? Ossia:
- quali strategie percettive alternative possono integrare l'esperienza artistica in un ambiente virtuale?
- cosa costituisce un'interazione utilizzabile, utile e coinvolgente per i non vedenti, facile da comprendere e ottenere?
- in che misura la realtà virtuale può rendere il valore emotivo o semantico di un'opera d'arte attraverso dispositivi di feedback tattile?
Queste sono le domande su cui si concentra tale lavoro. Si è alla ricerca di una lente virtuale che renda l'esperienza museale decisamente più inclusiva.
L'approccio progettuale è qualitativo. Da qui emerge una proposta concreta: un'applicazione di realtà virtuale per l'esplorazione sensoriale di opere d'arte attraverso un dispositivo aptico e un visore per la fruizione dell'audio spaziale e il tracciamento del movimento manuale, progettato per tradurre l'input visivo includendo l'output tattile.
L'intero processo è reso accessibile tramite il tatto; tuttavia, idealmente, l'obiettivo è creare un'esperienza che, sebbene progettata per i non vedenti, sia vantaggiosa per tutti gli altri, come metodi alternativi di percezione e apprezzamento dell'arte. Pertanto, in questo senso, l'obiettivo non è l'inclusione, ma una reinterpretazione del modo in cui guardiamo le cose. Perché la diversità percettiva dovrebbe guidarci come un punto di partenza positivo, non un ostacolo da superare.
In ultima analisi, questa tesi nasce da una domanda solida e fondata: come può l'arte diventare accessibile a chi non può più vedere? Per poter rispondere ed elaborare un progetto fattibile, la costruzione della tesi viene coltivata passo dopo passo attraverso la teoria, gli aspetti tecnici e i momenti produttivi necessari.
Più nello specifico, nel primo capitolo si analizza il contesto progettuale in cui si va ad operare, con riferimento alle normative e alle linee guida accennando alla disabilità visiva e facendo un primo riferimento alle definizioni ed agli ambiti applicativi della realtà virtuale.
Nel secondo capitolo si procede con un excursus della letteratura e degli apparecchi esistenti relativi ad accessibilità VR tracciando una possibile lettura dell'interazione uomo-computer in un'ottica inclusiva.
Il terzo capitolo inerisce all'analisi critica delle soluzioni esistenti, riallacciandosi alla accessibilità attuale

delineata nel capitolo precedente con riferimento agli elementi di spicco e alle eventuali criticità rilevate.
Con il quarto e il quinto capitolo si entra nella specificità del progetto, partendo dalle necessità emerse; in tale sede corre l'obbligo precisare che il lavoro si basa dal punto di vista concettuale e realizzativo sulla distinzione fra l'idea progettuale scaturita dagli studi prodromici condotti e la realizzazione concreta di un prototipo che prende forma in un dispositivo costituito essenzialmente da un guanto in tessuto tecnico al quale sono applicate delle guide (fungono anche da punti di trazione) che servono da sostegno per i sensori di flessione. Sull'esoscheletro che sovrasta il polso sono allocati i servomotori che stabiliscono la trazione o il rilascio dei cavi posti nelle richiamate guide, al fine di consentire, materialmente che le dita possano adeguarsi alla forma dell'opera presente solo nello spazio virtuale.
In chiusura della presente introduzione, corre l'obbligo di spiegare l'origine del nome del progetto ossia VidMentis: essa trae spunto dalle parole latine "video e mens-mentis" (a loro volta entrambe di origine sanscrita) che richiamano, appunto, l'idea che si riesca a vedere con la mente, intesa quale modalità di apprensione intellettiva che si traduce in comprensione.
Attesa la scelta progettuale e realizzativa per cui l'utilizzatore rimane in posizione seduta, si è deciso di porre a una determinata distanza dalla persona tutte le componenti hardware non indispensabili all'esperienza (ad esempio il microcontrollore).
Questa tesi è supportata da una Bibliografia delle opere citate e da Appendici di materiali rilevanti che devono essere documentati durante l'esperienza; diagrammi, considerazioni tecniche, mockup e informazioni visive e sensoriali a supporto di questa tesi.

G. AGAMBEN, *Alla foce,* Torino 2025, p.203. Ibid., 197.
A. MARCOLONGO *(a cura di), Omero e i poemi epici,* Torino, 2022, p. non indicata sul testo a stampa.
G.A. PRIVITERA *et al. (a cura di), Omero, Odissea,* Milano 2023, libri X, XI, XII e XXIII.
U. CURI, *La morte del tempo,* Bologna 2021, pag. 124.
M. CACCIARI, *Generare Dio,* Bologna 2017, pagg. 79-80.

01

Contesto teorico e progettuale

1.1. Normative, linee guida e standard europei e nazionali

Quando si parla di accessibilità, è fondamentale discutere di normative in un comparto, tra l'altro, dove si affastellano leggi e regolamenti nazionali e sovranazionali di non sempre agevole applicazione ai casi di specie.
Nel tempo, oltre all'esigenza etica di consentire la più ampia fruibilità dei servizi anche alle persone diversamente abili, sono state poste in essere una serie di linee guida, leggi, standard, regolamenti e raccomandazioni che hanno profondamente mutato - in positivo si intende - l'accessibilità di prodotti e servizi, rendendoli alla portata di un ampio pubblico.
Ciò non solo in ragione di una questione di tutela delle persone con disabilità, ma anche in ossequio a misure concrete, l'inosservanza delle quali comporta un giudizio di responsabilità per chiunque abbia l'onere di approntare misure tese alla realizzazione di esperienze inclusive.
La normativa nazionale si è uniformata a quella dell'Unione Europea in ragione dell'art. 11, comma 2 della Costituzione, per cui è permesso allo Stato di cedere parte della propria sovranità (potere decisionale) ad organismi sovranazionali (come l'UE o l'ONU) se ciò è necessario per garantire pace e giustizia a livello globale.
Pertanto, l'adesione dell'Italia all'UE (e all'ONU) ha consentito di recepire ed applicare tutta una messe di norme e regolamenti di settore.
In particolare, si fa riferimento a:
Convenzione sui diritti delle persone con disabilità approvata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite; la ratifica dell'Italia della Convenzione sui diritti delle persone con disabilità approvata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, segna un importante traguardo per il Paese intero.
La capacità di risposta ai bisogni delle persone disabili è uno degli indicatori principali di un Welfare moderno, maggiormente inclusivo, equo ed efficiente e l'Italia da oggi ha fatto un passo avanti decisivo in tale direzione.
La Convenzione rappresenta pertanto uno strumento condiviso dalla comunità internazionale che segna valori e obiettivi per ampliare il grado di inclusione sociale delle persone disabili. Governo e opposizione, regioni ed enti locali, imprese, mondo non profit e società civile sono tutti chiamati a realizzare, ciascuno con la propria responsabilità, una società dove le persone disabili possano essere sempre più protagoniste e libere.
La persona al centro, lo sviluppo integrale di ciascuna persona: è questa la nostra stella polare per riconoscere e promuovere il valore infinito della persona per il solo fatto che esista, così come è. Per questo mi preme innanzitutto richiamare l'art. 10 della Convenzione che afferma il diritto alla vita delle persone disabili: "Gli Stati Parti riaffermano che il diritto alla vita è connaturato alla persona umana ed adottano tutte le misure necessarie a garantire l'effettivo godimento di tale diritto da parte delle persone con disabilità (...)". Tale diritto deve essere difeso in ogni istante della vita, dal concepimento alla morte naturale, proprio perché la disabilità è un'esperienza umana in molti casi ancora misteriosa, che siamo chiamati a rispettare e a conoscere. Il concetto di disabilità

non indica più un assoluto della persona, come in passato, ma riguarda il rapporto tra la persona e il suo ambiente di riferimento. In tal senso, negli ultimi anni, soprattutto con l'avvento di nuove tecnologie, sono state abbattute numerose barriere riducendo il grado di disabilità, qualunque fosse il suo genere. Educazione e lavoro sono due ambiti particolari cui la Convenzione fa riferimento invitando a un impegno preciso istituzioni e società civile. Come per ogni persona, il percorso di istruzione e formazione e l'esperienza lavorativa rappresentano momenti essenziali anche per la vita di una persona disabile. E' necessario pertanto sviluppare percorsi, servizi e tecnologie nuove che permettano di rispondere adeguatamente a tali necessità[1].
In particolare, si richiama l'attenzione sul contenuto degli artt. 4 (Obblighi generali) e 5 (Uguaglianza e non discriminazione), disposizioni cardine per quanto di interesse nell'ottima dell'emanazione delle norme applicative.
Nondimeno, la normativa comunitaria è intervenuta, da ultimo, con l'European Accessibility Act (Direttiva 2019/882) relativa all'accessibilità di prodotti e servizi digitali (es. computer, smartphone), integrata dalla Strategia per i diritti delle persone con disabilità 2021-20302, nella consapevolezza che:

2. Accessibilità - un fattore abilitante dei diritti, dell'autonomia e dell'uguaglianza

L'accessibilità agli ambienti fisici e virtuali, alle tecnologie, alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC), ai beni e ai servizi, compresi i trasporti e le infrastrutture, è un fattore abilitante dei diritti e un prerequisito per la piena partecipazione delle persone con disabilità su un piano di parità con gli atri. Nell'ultimo decennio sono state adottate diverse norme dell'UE in vari ambiti, volte a rendere l'UE più accessibile alle persone con disabilità.

Milioni di persone con disabilità incontrano barriere nell'utilizzare trasporti, accedere agli edifici e ricevere informazioni

Il **64,3%** delle persone con disabilità di età pari o inferiore a 16 anni dispone di una connessione internet a casa, a fronte dell'**87,9%** delle persone senza disabilità

Con l'auspicio di pervenire a:

4. Qualità della vita dignitosa e vita indipendente

Una vita indipendente, servizi sociali e per l'occupazione di qualità, alloggi accessibili e inclusivi, la partecipazione all'apprendimento permanente, una protezione sociale adeguata e un'economia sociale rafforzata sono indispensabili per una vita dignitosa per tutte le persone con disabilità.

Vivono in istituti oltre un milione di minori e adulti con disabilità di età inferiore a 65 anni e oltre due milioni di persone con disabilità di età superiore a 65 anni

Lavora il 50,8% delle persone con disabilità, a fronte del 75% delle persone senza disabilità

Il 37,6% delle persone con disabilità è inattivo, a fronte del 17,6% di persone senza disabilità

Il 28,4% delle persone con disabilità è a rischio di povertà ed esclusione sociale, a fronte del 18,4% delle persone senza disabilità

4.1 Sviluppare una vita indipendente e rafforzare i servizi a livello della comunità

Le persone con disabilità, giovani e anziane, hanno il diritto come gli altri a vivere una vita indipendente e a essere incluse nella comunità, con pari possibilità di scelta riguardo a dove stabilire la propria residenza, a con chi vivere e come. Nell'ultimo decennio i finanziamenti dell'UE hanno fornito un importante contributo alla vita indipendente e all'inclusione nella comunità delle persone con disabilità[43]. Per una vita indipendente è necessario un panorama differenziato di servizi di qualità, accessibili anche dal punto di vista economico, e incentrati sulla persona, erogati a livello della comunità e della famiglia, tra cui l'assistenza personale, l'assistenza medica e gli interventi degli operatori sociali, facilitando in tal modo le attività quotidiane e offrendo possibilità di scelta alle persone con disabilità e alle loro famiglie.

Nello specifico, la Direttiva 2019/882, formalmente denominata Direttiva (UE) 2019/882 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 aprile 2019 sui requisiti di accessibilità dei prodotti e dei servizi3 nel preambolo, che si riporta a stralcio, dispone:

> (1) La presente direttiva ha lo scopo di contribuire al corretto funzionamento del mercato interno mediante il ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati membri in materia di requisiti di accessibilità per determinati prodotti e servizi, in particolare eliminando e prevenendo gli ostacoli alla libera circolazione di determinati prodotti e servizi accessibili derivanti dall'eterogeneità dei requisiti di accessibilità negli Stati membri. Ciò aumenterebbe la disponibilità di prodotti e servizi accessibili nel mercato interno e migliorerebbe l'accessibilità delle pertinenti informazioni.
> [...]
> (24) La presente direttiva contiene una serie di criteri funzionali di prestazione relativi alle modalità di funzionamento di prodotti e servizi. Tali criteri non sono intesi come un'alternativa generale ai requisiti di accessibilità stabiliti dalla presente direttiva, ma dovrebbero essere utilizzati soltanto in circostanze molto specifiche. I suddetti criteri dovrebbero essere applicati a funzioni o caratteristiche specifiche di tali prodotti o servizi, per renderli accessibili, quando i requisiti di accessibilità della presente direttiva non trattano una o più di tali funzioni o caratteristiche specifiche. In aggiunta, nel caso che un requisito di accessibilità contenga requisiti tecnici specifici, e nel prodotto o nel servizio sia fornita una soluzione tecnica alternativa a detti requisiti tecnici, tale soluzione tecnica alternativa dovrebbe essere comunque conforme ai pertinenti requisiti di accessibilità, e dovrebbe produrre un'accessibilità equivalente o maggiore, applicando i pertinenti criteri funzionali di prestazione.

E' di tutta evidenza (e non potrebbe essere altrimenti) che l'orientamento comunitario in senso ampiamente inclusivista circa le disabilità.

WCAG - Linee guida per l'accessibilità dei contenuti web

Le linee guida per l'accessibilità dei contenuti Web (WCAG) 2.2 comprendono una grande varietà di raccomandazioni per consentire una maggiore accessibilità ai contenuti web. Seguire queste linee guida rederà accessibili i contenuti ad un più ampio numero di persone con disabilità, tra cui cecità e ipovisione, sordità e perdita dell'udito, limitazioni motorie, disabilità del linguaggio, fotosensibilità nonché combinazioni di queste, e migliorerà in parte l'accessibilità anche per chi ha disturbi dell'apprendimento e/o limitazioni cognitive. Le linee guida non potranno comunque ritenersi esaustive per tutte le esigenze degli utenti con tali disabilità. Queste linee guida riguardano l'accessibilità dei contenuti web applicabili a dispositivi desktop, laptop, tablet e mobili. Seguirle aiuterà a rendere i contenuti Web più usabili dagli utenti in generale. I criteri di successo per le WCAG 2.2 consistono in istruzioni testabili che non dipendono dalla tecnologia utilizzata. Le indicazioni riguardo il soddisfacimento dei criteri di successo per specifiche tecnologie e le informazioni generali sull'interpretazione dei criteri stessi sono fornite in documenti distinti. Per leggere un'introduzione alle specifiche e reperire link al materiale tecnico e formativo sulle linee guida WCAG, consultate il documento panoramica delle linee guida per l'accessibilità dei contenuti Web (WCAG). Le WCAG 2.2 ampliano le linee guida per l'accessibilità dei contenuti Web 2.1 [WCAG21], pubblicate come W3C Recommendation nel giugno 2018. I contenuti che risultano conformi alle WCAG 2.2 lo sono anche rispetto alle WCAG 2.1. Il gruppo di lavoro si propone che le WCAG 2.2 forniscano un mezzo alternativo di conformità per le policy che richiedono la conformità rispetto alle WCAG 2.0 o alle WCAG 2.1. La pubblicazione delle WCAG 2.1 non inficia né sostituisce le WCAG 2.0 o WCAG 2.1. Mentre le WCAG 2.0 e WCAG 2.1 restano W3C Recommendation, il W3C consiglia l'uso delle WCAG 2.2 per massimizzare la futura applicabilità degli sforzi verso una maggiore accessibilità. Il W3C favorisce anche l'uso della versione più recente delle WCAG nello sviluppo o aggiornamento dei vincoli di accessibilità Web[4].

Si tratta delle linee guida più complete e riconosciute a livello internazionale divenute applicabili in vari casi anche ad applicazioni mobili e spazi immersivi. Esse si basano su quattro principi fondamentali contraddistinti dall'acronimo POUR:

- **Percepibile**: tutte le informazioni devono essere accessibili a chi non può vedere.
- **Operabile**: tutte le interfacce devono essere navigabili da chiunque utilizzi una varietà di strumenti.
- **Comprensibile**: il contenuto deve essere uniforme e facilmente prevedibile.
- **Robusto**: tutti i sistemi devono funzionare con le tecnologie assistive attuali e future.

In particolare, la versione più recente delle WCAG 2.2 è stata pubblicata solo nel 2023 e presenta criteri più strettamente allineati con i deficit motori, la comprensione cognitiva e l'interfacciamento complesso. Questo è importante perché molti presumono che le WCAG siano rilevanti solo per scopi web, ma possano applicarsi sempre di più a esperienze multimodali e mondi digitali, dove i sostituti tattili e acustici diventano sempre più urgenti per un accesso equo.

Per le applicazioni VR, ad esempio, le WCAG forniscono raccomandazioni che possono facilitare la navigazione senza occhi o esperienze eque per coloro che riescono a comprendere meglio il suono, il tatto o il movimento piuttosto che l'interpretazione visiva all'interno di spazi definiti.
Giova aggiungere che esistono iniziative emergenti che si applicano più specificamente alla realtà virtuale e agli spazi immersivi. Ad esempio, XR Access5 è una rete collaborativa di ricercatori, designer e aziende che si uniscono per standardizzare l'accessibilità nelle Realtà Estese (XR), inclusa la realtà virtuale. L'obiettivo è creare spazi digitali accessibili fin dall'inizio, anziché in un secondo momento.
Infine, l'accessibilità può e deve essere un vantaggio normativo, ma anche un vantaggio per la progettazione creativa. Seguire queste linee guida non significa solo conformità, ma anche riconoscere che gli sforzi verso l'inclusione sono vantaggiosi per tutte le parti coinvolte. Progettare per il tatto, l'udito, l'equilibrio e la consapevolezza corporea non dovrebbe inibire l'immersione virtuale, ma piuttosto migliorarla attraverso nuovi linguaggi, nuove capacità, nuove forme di coinvolgimento.
Quindi, le normative non sono un ostacolo al processo di progettazione, sono amiche del processo. Rendono tangibile qualcosa di così semplice e idealistico che nessuno dovrebbe mai rinunciare all'accesso all'esplorazione, alla comprensione o persino alla sensazione. Nemmeno nella realtà virtuale.

1.2 Disabilità visive: ipovisione e cecità

Quando si considera l'accessibilità in VR per le creazioni visive, è necessario capire cosa significhi essere ipovedenti, al fine trattare la materia partendo dalle definizioni per giungere ad un approccio pratico e costruttivo, in ordine a definizioni colloquiali di cieco e completamente cieco rispetto a ipovedente. Laddove una definizione potrebbe essere sufficiente, esiste invece un continuum. Documento fondamentale per la comprensione del comparto e per una sistematica presa d'atto, è la Relazione del Ministro della Salute sullo stato di attuazione delle politiche inerenti la prevenzione della cecità, l'educazione e la riabilitazione visiva (legge 284/97)6, del 2023 dalla quale si rileva che, ai sensi della legge n. 138/2001 Classificazione e quantificazione delle minorazioni visive e norme in materia di accertamenti oculistici sono definiti:

- **ciechi totali**: coloro che sono colpiti da totale mancanza della vista in entrambi gli occhi; coloro che hanno la mera percezione dell'ombra e della luce o del moto della mano in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore; coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 3 per cento;
- **ciechi parziali**: coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 1/20 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione; coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 10 per cento,
- **ipovedenti gravi**: coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 1/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione; coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 30 per cento;
- **ipovedenti medio-gravi**: coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 2/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione; coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 50 per cento;
- **ipovedenti lievi**: coloro ch e hanno un residuo visivo non superiore a 3/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione; coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 60 per cento.

Si rileva, prima facie, che il termine cieco ha natura tecnico/normativa e l'utilizzo dello stesso non è offensivo e non costituisce mancanza di rispetto in relazione al portatore della disabilità, come ho constatato, tra l'altro, nei rapporti intrattenuti con referenti del Museo Omero.
Tuttavia, al di là delle caratteristiche cliniche, esiste un livello funzionale soggettivo che deve essere riconosciuto. Due individui possono avere la stessa acutezza visiva ma percepire il mondo in modo diverso in base ad altri fattori: età di insorgenza, condizioni e limitazioni, contesti situazionali, livelli di indipendenza. Ad esempio, alcune persone ipovedenti possono vedere forme e colori, ma possono leggere testi o muoversi in spazi senza luce. Altri, ciechi dalla nascita, possiedono una consapevolezza spaziale basata esclusivamente sui sensi uditivo e tattile e sulla memorizzazione.
Pertanto, quando si creano esperienze digitali e si determina cosa possa essere percepito come accessibile, è necessario andare oltre i concetti di visivamente capace e non vedente, per arrivare a una differenza percettiva che funga da punto di partenza per la progettazione.
Quando si parla di musei, la disabilità visiva pone evidenti complicazioni per la persona con questa disabilità. L'esperienza espositiva dipende quasi interamente dal senso visivo: dipinti dietro vetri o barriere, pannelli stampati con caratteri piccoli, illuminazione per creare atmosfera anziché chiarezza. Pertanto, l'esperienza diventa non solo inaccessibile, ma anche frustrante per coloro che non riescono a percepire lo spazio come previsto.
Per una persona non vedente, il museo è uno spazio da attraversare ma non da coinvolgere veramente. Per una persona ipovedente, spesso le complicazioni si traducono in esaurimento e disorientamento, o addirittura esclusione. Anche se vengono previste soluzioni (audioguide, pannelli braille), si tratta di strumenti paralleli che non vengono mai pienamente sfruttati nell'esperienza espositiva.

Lo stesso vale per la realtà virtuale, sia come complicazione che come opportunità. Se realizzata entro i limiti previsti, può migliorare le aspettative del museo fisico, se affrontata da un punto di vista multisensoriale, offre nuove esplorazioni e coinvolgimenti che riappropriano il corpo e i sensi al di fuori della vista.
Ad esempio, le nozioni uditive, tattili e spaziali di come si interagisce con un'opera d'arte non ne sminuiscono il valore, ma la rendono accessibile attraverso diversi punti di accesso. Ciò significa consentire a una persona non vedente di percepire la forma di una scultura attraverso guanti tattili o di percepire le dimensioni di una stanza in base alla direzione del suono in cui deve posizionarsi spazialmente.
Pertanto, per quanto la realtà virtuale offra opportunità di accessibilità, senza un riconoscimento preventivo dell'accessibilità per i non vedenti, questa ha senso attraverso una prospettiva progettuale che trasforma la realtà per tutti. Pertanto, ripensare l'accesso virtuale ai musei non si limita ad aggiungere funzionalità assistive, ma implica l'intero ragionamento percettivo attraverso cui esistono le esperienze culturali, anche per i normodotati.
Quando si pensa alla creazione tecnologica, è facile valutare prestazioni e velocità, efficienza e qualità dell'esperienza. È più difficile, tuttavia, intendere qualcosa di veramente e significativamente rilevante e urgente valutando chi può effettivamente accedere a tale creazione. Nel mondo digitale, l'accessibilità deve essere coniugata con l'inclusione: qualcosa non solo deve essere tecnicamente disponibile, ma anche utilizzabile e comprensibile da tutti, indipendentemente dalle capacità sensoriali, motorie o cognitive.
Il design inclusivo dovrebbe essere in primo piano fin dall'inizio, e non come una categoria speciale separata. Al contrario, il design permeerà spazi, interazioni e informazioni che accolgono la diversità come parte naturale dell'esperienza umana. Il ragionamento è semplice: se qualcosa è facilmente comprensibile per una persona con bisogni speciali, molto probabilmente sarà più facilmente comprensibile e accessibile anche per qualsiasi altro utente. Culturalmente, questo approccio è già implementato in luoghi come il Museo Tattile Statale Omero di Ancona, dove l'accessibilità non visiva non è affiancata all'accessibilità visiva come un percorso separato, ma integrata nell'esperienza museale.
Questo si estende oltre una società mondiale in cui potrebbe esistere un design adattivo, che crea per la maggioranza e poi si adatta per la minoranza. No, il design universale getta le basi per un design inclusivo. Il design universale è stato applicato prevalentemente nei dibattiti architettonici e successivamente nel mondo digitale. Ad esempio, non è sufficiente rendere disponibile l'audio del testo scritto a chi non sa leggere. È necessario formattarlo in modo che l'audio sia il punto di accesso primario attraverso il quale tutti possono interagire con tali informazioni.
Ad esempio, questo è fondamentale nel mondo della realtà virtuale. La natura stessa dell'essere all'interno della realtà virtuale richiede agli utenti di navigare in spazi tridimensionali, discernere segnali visivi e collegare il movimento all'interno dello spazio stesso, il che è limitante per chi non può vedere. Tuttavia, affrontato da una prospettiva di design inclusivo, aiuta a ricontestualizzare l'esperienza: l'audio spaziale, le vibrazioni, il feedback tattile e la narrazione vocale possono contribuire a creare significato, collocazione e coinvolgimento.

Qui, l'accessibilità non si riduce a una checklist di requisiti da un punto di vista tecnico. Piuttosto, l'accessibilità è una decisione metodologica ed etica che permea ogni fase della creazione, dalla progettazione concettuale alla formattazione dell'interfaccia, fino al modo in cui le persone interagiscono con le informazioni concettualizzate. Pertanto, poiché le considerazioni sull'accessibilità sono parte del processo di creazione stesso, emerge una soluzione equa, oltre a soluzioni potenzialmente più ricche, intelligenti ed empatiche.
Infine, è importante comprendere che accessibilità e inclusione non sono la stessa cosa ma, allo stesso tempo, rappresentano lo stesso progresso. L'accessibilità è la conoscenza tecnica e la capacità di gestire un sistema, mentre l'inclusività è il livello di coinvolgimento emotivo, partecipazione, dignità e appartenenza, così come sono intese dal punto di vista dell'utente. I luoghi accessibili sono una cosa. I luoghi inclusivi sono un'altra laddove entrano in gioco la progettazione compassionevole, ascolto attivo e consapevolezza di una varietà di esperienze vissute.

1.3 La realtà virtuale: definizioni e ambiti di applicazione

Quando si pensa alla realtà virtuale nel linguaggio comune, spesso si evocano immagini di mondi immersivi, spazi digitali esplorati da visori e sensori, esperienze generalmente legate al gaming o all'intrattenimento. Ma la realtà virtuale (VR) è molto di più: un linguaggio, una tecnologia, ma anche un nuovo metodo di mettere in relazione il corpo, lo spazio e le informazioni.
La realtà virtuale è tecnicamente un sistema 3D interattivo che utilizza un computer per creare un ambiente artificiale in cui un utente può interagire e dove gli utenti navigano, agiscono e ricevono stimoli sensoriali, i più impressionanti dei quali sono sempre più visivi (vista), uditivi (suono) e tattili (tocco). Questo si differenzia dalle interfacce digitali più basilari in cui uno schermo è lì solo per essere guardato, nella VR uno schermo diventa un ambiente in cui un utente può entrare.
Negli ultimi trent'anni circa, la realtà virtuale si è evoluta a un ritmo rapido. Ciò che un tempo era utile per i laboratori e le simulazioni militari si è esteso a una varietà di campi, con benefici per

la formazione professionale, la medicina, l'architettura, la psicologia, le arti e la cultura, solo per citarne alcuni. Il punto in comune tra questi campi è la capacità di sperimentare uno scenario potenzialmente complesso in un ambiente sicuro e controllato, che altrimenti sarebbe troppo delicato o scomodo di persona.
Ad esempio, la realtà virtuale si trova in ambito educativo, dove gli studenti possono esplorare ambienti storici ricostruiti in tre dimensioni, sperimentare studi scientifici attraverso metodi esplorativi e analizzare scenari lavorativi . In medicina, la realtà virtuale viene utilizzata per la formazione chirurgica, la fisioterapia e il trattamento di fobie e traumi. La realtà virtuale può essere uno strumento per la formazione professionale, fornendo al contempo una valutazione delle competenze lavorative in uno spazio immersivo.
Un campo di particolare interesse è l'ambito artistico/museale. La realtà virtuale consente sia la ricostruzione di sale storiche perdute da tempo e mostre inaccessibili, sia di nuove esperienze sensoriali che potenzialmente coinvolgono il visitatore a un livello più personale. Ad esempio, è possibile camminare all'interno di un'opera d'arte, ammirare l'interno di un affresco o immergersi in una scena dipinta al suo interno.
Tuttavia, la promessa di coinvolgimento che la realtà virtuale vanta non è necessariamente valida per tutti gli utenti allo stesso modo.
Le capacità immersive attualmente disponibili sul mercato sono ottimali per gli utenti con capacità visive, in grado di navigare in presentazioni sempre più complesse e dettagliate.
Questo solleva la domanda: chi è escluso dall'esperienza? Inoltre, come si possono adattare tali esperienze per includere coloro che percepiscono il mondo attraverso diversi canali sensoriali?
In questo modo, la realtà virtuale è più di un semplice strumento, ma un campo di esplorazione proiettiva. Una cosa è creare spazi realistici, un'altra cosa è renderli inclusivi, coinvolgenti e produttivi per tutti, soprattutto per coloro che non riescono a vedere cosa succede intorno ad essi.
Non percepiamo mai tutto ciò che ci circonda usando un solo senso. Anche se la vista è il senso più spesso sostenuto, è una questione di sintesi multisensoriale, poiché tatto, udito, equilibrio, movimento e forse persino l'olfatto, si combinano in misura maggiore per comprendere la realtà di ciò che ci circonda.
Eppure, per i non vedenti e gli ipovedenti, una tale meraviglia della realtà non è una scelta, ma una parte della vita. Dove la vista fallisce (o riesce parzialmente), altri sensi orientano, determinano oggetti, interagiscono con spazi e persone. Pensiamo al tatto. Toccare qualcosa significa sapere dove si trova, quanto è pesante e dedurne lo scopo. Lo stesso vale per l'udito: si possono sentire le cose intorno a sé e sapere dove si trovano persone e cose, si può valutare una distanza, un'angolazione e persino una consistenza.
In ambito culturale, la logica multisensoriale è già praticata da realtà come il Museo Tattile Statale Omero di Ancona, dove l'esplorazione tattile e la mediazione sonora non sono un ripiego, ma un modo legittimo e strutturato di costruire relazione con l'opera.
Con tutto ciò, nella realtà virtuale, questi canali non sono ancora pienamente considerati. Molte (se non la maggior parte) delle esperienze immersive si basano sull'estetica visiva, le possibilità espressive del suono e del tatto spesso vengono trascurate. Eppure, quando si opera in tali ambienti, diventa più facile e più accessibile impegnarsi in tale impresa attraverso dispositivi audio e

touch che rendono esperienze altrimenti separate più immersive, realistiche e significative per tutti. Ad esempio, il tocco tattile virtuale consente di percepire superfici, angoli, texture e corpi. Questo è possibile attraverso dispositivi come i guanti tattili, che trasformano la percezione dell'arte da qualcosa di tangibile a qualcosa di così tangibile da poter diventare parte dell'esperienza umana attraverso il tatto. Allo stesso modo, l'audio spazializzato può guidare l'utente attraverso un ambiente senza distrarlo o migliorare l'eccessiva capacità di adattamento dei miglioramenti visivi nel tentativo di rendere un paesaggio sonoro complesso, stratificato e personalizzato.
Sebbene nel mondo della embodied cognition siano disponibili molti elementi a supporto della teoria del significato che emerge non solo dal pensiero astratto, ma anche attraverso la dinamica del corpo che interagisce con il mondo, è logico che muoversi e percepire quindi interagire con il suono e il tatto crei significato e memoria. Questo è particolarmente vero nei mondi virtuali, dove l'astrazione è così semplice e un corpo può facilitare il superamento del divario esperienziale nella comprensione del significato.
Pertanto, un design multisensoriale non è necessariamente pensato per colmare le lacune della disabilità visiva ma è la nuova visione dell'interazione digitale che è intrinsecamente più profonda, più umana e più in linea anche con le realtà più minute dell'esperienza oggettiva.

Museo Tattile Statale Omero
Ancona

Fonti:

1 https://pninclusione21-27.lavoro.gov.it/sites/default/files/2023-10/Convenzione%20ONU.pdf

2 https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/strategy-for-the-rights-of-persons-with-disabilities.html

3 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0882

4 https://www.w3.org/Translations/WCAG22-it/#background-on-wcag-2

5 https://xraccess.org/

6 https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_3402_allegato.pdf

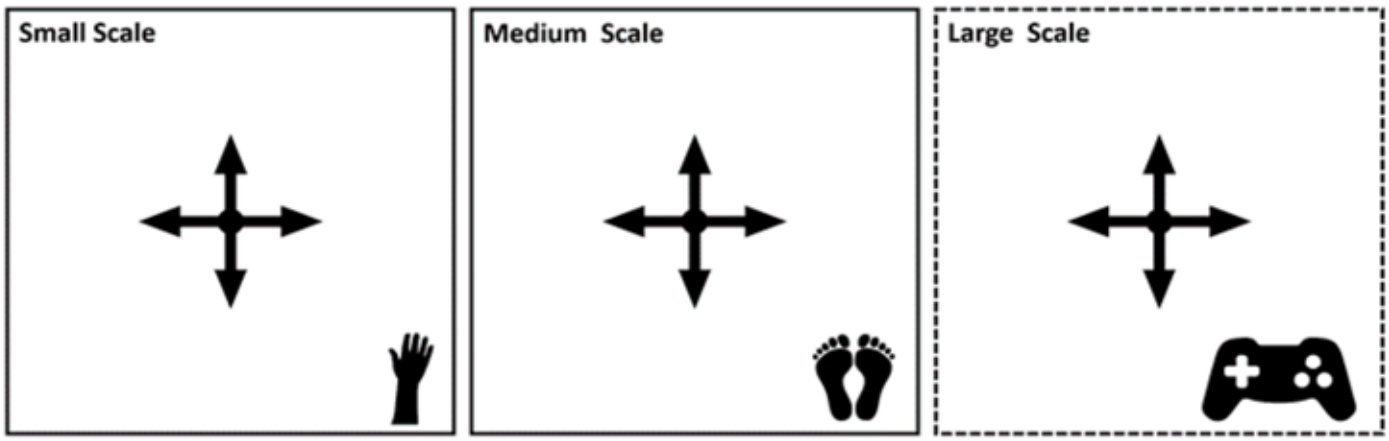
02

Stato dell’arte sulla VR accessibile per non vedenti

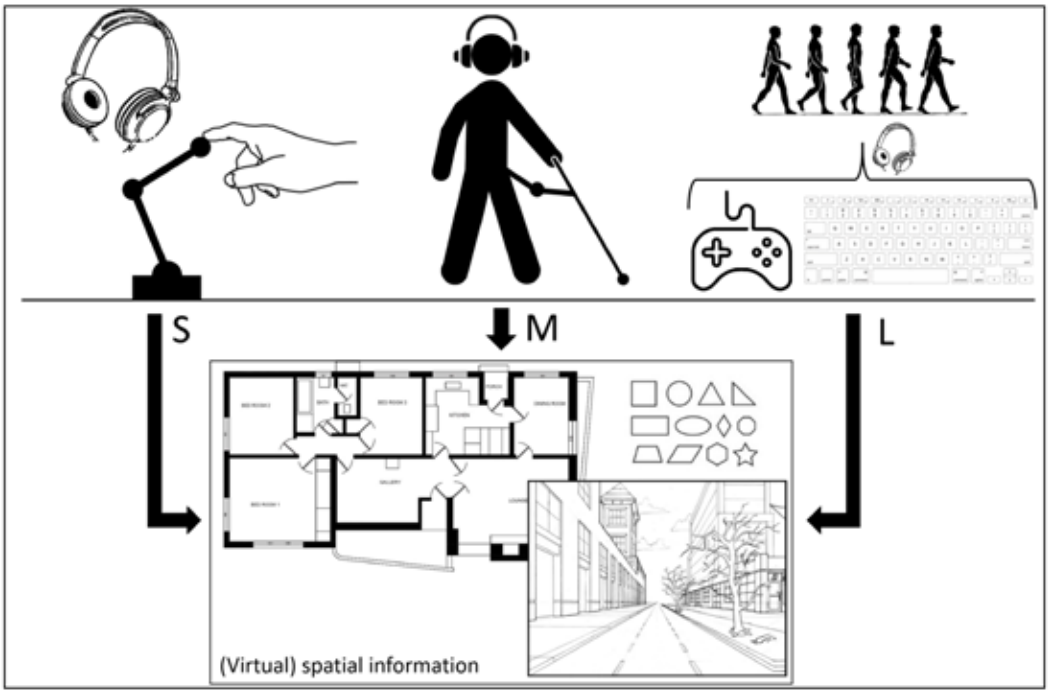
2.1 Tecnologie assistive nella VR per non vedenti

La realtà virtuale, in quanto tecnologia immersiva, si basa su segnali visivi per creare significato e orientamento nello spazio. Per le persone non vedenti o ipovedenti però, questo tipo di esperienza può essere invalidante. La ricerca sulla tecnologia assistiva VR esplora come superare le sfide di questo mezzo attraverso dispositivi innovativi, interfacce multisensoriali e strategie di interazione alternative che possano rendere la VR un'esperienza significativa senza la necessità di informazioni visive.
Tuttavia, la tecnologia assistiva non è un'aggiunta all'esperienza VR standard: come evidenziato dalla ricerca, dispositivi con queste opzioni possono convertire le informazioni visive in segnali udibili, tattili o altri segnali più accessibili per le persone non vedenti, consentendo loro di trovare modi alternativi per navigare, esplorare e comprendere l'ambiente virtuale. La ricerca suggerisce che la tecnologia assistiva per non vedenti può consentire loro di interagire, interagire e sperimentare la VR alle proprie condizioni e, in alcuni casi, in modi che non avrebbero mai immaginato.
Un'area chiave della ricerca si concentra sulle interfacce multisensoriali che combinano suono, tatto e movimento per creare una rappresentazione del mondo VR accessibile a chi non può vederlo.
La chiave dei vari sviluppi tecnologici descritti nelle ricerche successive è quella di coinvolgere in modo coordinato i sensi rimanenti, creando una serie di segnali coerenti che possono essere utilizzati per la navigazione.
Ad esempio, la ricerca che integra *feedback* uditivo e tattile, illustra come i sistemi possano creare mappe spaziali e segnali di navigazione attorno a sé in VR attraverso suoni direzionali o vibrazioni localizzati attorno alla posizione dell'utente. Dispositivi come il simulatore di bastone virtuale o i controller tattili sono stati progettati per utilizzare il concetto di esplorazione fisica per utenti non vedenti, fornendo input non visivi per gli stessi scopi; le competenze acquisite in precedenza potrebbero essere trasferite nell'esperienza VR, il che si è rivelato utile nella creazione di rappresentazioni cognitive dello spazio e persino nel miglioramento delle prestazioni in compiti legati all'orientamento.
In un altro esempio di approccio multisensoriale, la ricerca ha proposto di combinare comandi gestuali, *feedback* sonoro e input tattile, consentendo all'utente di esplorare elementi dell'ambiente, come indicatori di punti di interesse o oggetti nello spazio, nel modo più naturale possibile, senza bisogno della vista.
Questi esempi vengono chiamati modelli di interazione multimodale, che consentono agli utenti di esplorare la propria esperienza VR attraverso segnali uditivi o percettivi, piuttosto che visivi.
Un'altra area di ricerca riguarda l'utilizzo della VR in processi di esplorazione simulata, in cui l'orientamento e la mappatura cognitiva avvengono tramite segnali sonori e tattili per compensare la mancanza di informazioni visive. In questi studi, mondi virtuali con segnali multisensoriali sono stati utilizzati per aiutare gli utenti non vedenti a creare modelli mentali di spazi che potrebbero poi essere applicati nel mondo reale, migliorando le loro capacità di orientamento e mobilità.
Gli approcci MDPI mostrano come, con un approccio coordinato agli input sensoriali alternativi, sia

possibile utilizzare la realtà virtuale per supportare l'acquisizione di informazioni spaziali complesse nell'apprendimento cognitivo, per un tipo di apprendimento spaziale che va oltre i semplici segnali visivi, ma include anche quelli tattili e percettivi, fondamentali per l'indipendenza dell'utente.
Oltre agli studi sperimentali, sono stati creati un numero crescente di progetti e tecnologie assistive che mirano a migliorare l'accesso alla realtà virtuale per le persone con disabilità visiva.
Alcuni si concentrano su:
• Sistemi di navigazione multisensoriale che combinano feedback audio, tattile e di movimento per indicare ostacoli o segnali spaziali all'interno di un ambiente virtuale;
• Componenti aggiuntivi hardware leggeri con feedback tattile ad alta fedeltà progettati per consentire la libera esplorazione dello spazio;
• Applicazioni orientate alla formazione per l'orientamento e la mobilità che utilizzano la realtà virtuale come ambiente sicuro per esercitarsi in attività di navigazione complesse.
Nel loro insieme, questi esempi dimostrano come la ricerca non cerchi solo di adattare la tecnologia esistente, ma esplori anche nuovi approcci progettuali come strategie di rappresentazione alternative per la mappatura dello spazio, meccanismi di esplorazione fisica e interfacce che integrano più sensi simultaneamente.
La realtà virtuale è nata con una tecnologia visivamente dominante. Tuttavia, con l'aumento dell'accesso e della progettazione inclusiva, progettisti e ricercatori hanno iniziato a realizzare sistemi VR che includevano canali sensoriali alternativi per rendere le esperienze virtuali più ricche, complete e, soprattutto, accessibili a quegli utenti che non potevano fare affidamento solo sulla vista. Questi sistemi creano *feedback* audio, tatto e aptico che possono contribuire notevolmente alla creazione di interazioni significative in ambienti immersivi accessibili.



Distinzione tra piccola, media e grande scala in base all'interfaccia utente per l'esplorazione spaziale
Fonte MDPI



Esempi di applicazioni VR camminabili e toccabili di piccole, medie e grandi dimensioni
Fonte MDPI

AUDIO: SUONO SPAZIALE

Il canale uditivo è il primo ad essere esplorato nel campo delle esperienze VR accessibili. Il ragionamento alla base della sua inclusione è molto semplice. L'"audio" o suono spazializzato può fornire informazioni su direzione, distanza, movimento e presenza.
Guerreiro et al. (2023) propongono un modello di rappresentazione uditiva degli oggetti in VR e di come suoni distinti possano rappresentare la forma, il materiale o la funzione di un oggetto, in modo che possa essere identificato senza input visivo.
Questo rivela che il suono può sostituire l'immagine e guidare l'utente nell'esplorazione dello spazio in cui si trova.
Lo spazio uditivo diventa una mappa mentale 3D dell'area che sta esplorando.

TATTO: LA PELLE COME INTERFACCIA COGNITIVA

Il tatto è simile alla postura, ma si basa sulla capacità del corpo di percepire contorni, pressione, vibrazioni e texture. Nella VR, questa componente è fondamentale e utilizzata per costruire un senso fisico di contatto con l'esperienza spaziale.
Colwell et al. (1998) hanno scoperto che il feedback tattile consente agli utenti non vedenti di esplorare lo spazio 3D in modo più efficace, facilitando la comprensione spaziale e l'interazione con gli oggetti, ciò consente un'interazione fisica diretta con ciò che si vede nello spazio circostante.
È una forma di percezione che consente stabilità cognitiva durante l'esplorazione di ambienti immersivi.

APTICO: UTILIZZA PIÙ SISTEMI DI TOCCO

Il termine aptico è spesso utilizzato allo stesso modo dei sistemi tattili, tuttavia, i sistemi aptici si riferiscono a diverse parti del corpo, tra cui articolazioni e muscoli, percezione del movimento e della forza. I sistemi aptici contribuiscono a trasmettere azione, peso e resistenza.
Espinosa Castañeda et al. (2020) affermano che l'utilizzo di sistemi VR con feedback tattile consente agli studenti non visivi di apprendere concetti spaziali e rappresentazioni geometriche attraverso l'interazione con oggetti virtuali, questo migliora l'esperienza cognitiva con azioni che appaiono relativamente naturali per coloro che sono abituati a toccare oggetti nel mondo reale, fornendo così input come forma, proporzioni e profondità all'utente quando tocca qualcosa che desidera esplorare ulteriormente.

Haptx Gloves

L'INTEGRAZIONE MULTISENSORIALE

I ricercatori hanno studiato diverse idee fino a giungere a una conclusione per ciascun sistema sensoriale progettato per lo spazio 3D: combinare i sensi è sempre meglio che utilizzarne solo uno. L'interazione multisensoriale consente un'immersione più profonda, ma soprattutto consente a un utente non visivo una comprensione più significativa dello spazio.
Kreimeier et al. (2020) discutono una tassonomia di ambienti VR accessibili per utenti non vedenti e ipovedenti e come i sistemi audio tattili su piccola o larga scala siano essenziali per l'interazione naturale; la combinazione di suono e tatto offre un'esperienza unica che consente all'utente di sviluppare mappe mentali dello spazio circostante, interagendo con ciò che può sentire e percepire in modo efficace e motivante.

2.2 Esperienze e progetti esistenti di VR accessibile

Questo crescente interesse ha portato allo sviluppo di progetti specifici per la realtà virtuale accessibile per utenti ipovedenti, alcuni dei quali hanno avuto un eccellente impatto in termini di ricerca e sperimentazione. Alcuni erano prototipi pubblici o installazioni artistiche accessibili, ma, per quanto riguarda i più interessanti, quelli che più criticamente evidenziano anche limitazioni comuni, quali un'attenzione al canale visivo di ricezione e la mancanza di soluzioni canoniche per l'interazione multisensoriale non visiva.
Il confronto con pratiche museali già orientate alla fruizione non visiva, come quelle del Museo Tattile Statale Omero di Ancona, consente di leggere progetti VR non solo come dimostrazioni tecnologiche, ma come tentativi di tradurre in digitale un'idea di accesso culturale costruita attorno a tatto, ascolto e mediazione. Nel progetto di Zaal et al. (2022), presentato nella documentazione della conferenza IEEE AIVR, i visitatori ipovedenti hanno esplorato un museo virtuale con feedback audio e risposta tattile migliorati che hanno permesso di localizzare e riconoscere le opere d'arte più facilmente rispetto alle esperienze di realtà virtuale tradizionali.
Questo dimostra che è possibile costruire un museo accessibile anche in un ambiente completamente virtuale. Tuttavia, in questo caso, il livello di interazione è per lo più determinato dalla descrizione e l'interazione è limitata a stimoli passivi, piuttosto che all'esplorazione corporea.
Il secondo progetto più rilevante è la mostra allestita a Praga nel 2018 dove alcuni capolavori della storia dell'arte sono stati "tradotti" in sculture virtuali da esplorare attraverso un guanto tattile. Il progetto è stato riportato su The Sun e ripreso in una documentazione più popolare su Medium, che ha chiarito che l'arte virtuale accessibile era lì per permettere ai visitatori non vedenti di "toccare" opere di Michelangelo o Canova, percependone la forma attraverso vibrazioni e pressione. "Per la prima volta ho potuto comprendere la posizione e le proporzioni di una statua di cui sentivo parlare da anni ma che non avevo mai 'visto'", ha affermato un partecipante non vedente citato su Medium, 2018.
Questo dimostra che la realtà virtuale accessibile ha un grande potere narrativo ed educativo anche al di fuori dei laboratori universitari. Tuttavia, si tratta solitamente di installazioni temporanee e non di musei virtuali aperti e permanenti.

Touching Masterpieces
Galleria Nazionale di Praga

PROTOTIPI PUBBLICI PER USO DIDATTICO

Alcuni progetti si concentrano su ambiti di apprendimento attraverso l'apprendimento potenziato dalla realtà virtuale per la comprensione spaziale, geometrica o interculturale. In questo caso, l'accessibilità viene applicata come parte integrante del processo di progettazione con l'obiettivo di migliorare l'autonomia dell'utente.
Espinosa Castañeda et al. (2020) propongono un sistema educativo con feedback tattile per studenti non vedenti, dimostrando che la manipolazione tattile attraverso la prossimità di costruzione causa-effetto migliora la costruzione di concetti complessi e la regolazione per l'apprendimento. In questo caso, la manipolazione tattile non è un ripensamento per migliorare l'usabilità, ma uno strumento pedagogico attivo.

GIOCHI E SIMULAZIONI ACCESSIBILI

Un interessante campo di sperimentazione è quello dei giochi accessibili progettati per utenti ipovedenti o non vedenti. Molti aggiungono segnali sonori direzionali, navigazione guidata vocale, descrizioni dell'ambiente circostante e risposte vibratorie.
Il gioco per utenti non vedenti "Virtual Showdown", descritto da Wedoff et al. (2019), incorpora segnali verbali e feedback tattile che hanno permesso ai giovani non vedenti di interagire con oggetti in movimento con risultati paragonabili a quelli dei coetanei vedenti. Nel complesso, l'esperienza è stata valutata come coinvolgente e stimolante.
Il gioco rappresenta un interessante banco di prova per verificare se segnali alternativi funzionano anziché un requisito standard per gli input accessibili. Nonostante alcune esperienze positive di cui sopra, emergono tre principali critiche:

- La maggior parte dei progetti è ancora sperimentale o temporanea;
- Il feedback tattile è ancora limitato alle forme vibratorie di base;
- L'accessibilità viene talvolta integrata in un secondo momento.

Queste limitazioni hanno aperto nuove strade a progetti come quello proposto da questa tesi, che mira a costruire un'esperienza museale VR accessibile fin dalla fase di ideazione con una struttura narrativa pensata e costruita per l'esplorazione attraverso il corpo, il suono e il movimento.

Haptic Device Touch X

2.3 Interazione Uomo-Computer in chiave inclusiva

L'Interazione Uomo-Computer (HCI) è lo studio delle modalità di relazione tra le persone e le tecnologie informatiche. Mentre storicamente l'HCI si è sviluppata attorno all'uso di mouse/tastiera/monitor, oggi si confronta con sistemi immersivi, gestuali e multisensoriali in cui l'utente è al centro dell'attenzione. Per i non vedenti, relazionarsi con i sistemi digitali pone sfide specifiche che riguardano non solo l'accesso ai contenuti ma anche la natura dell'interazione stessa. Il design inclusivo, quindi, deve andare oltre il "rendere tutto leggibile", offrendo modalità d'uso alternative in grado di sfruttare i canali sensoriali disponibili e offrire esperienze ricche, fluide e coerenti.

DAL DESIGN VISIVO AL DESIGN MULTISENSORIALE

Innumerevoli volumi di letteratura sull'HCI hanno trattato interfacce grafiche composte da icone, finestre, pulsanti e simili. Tuttavia, per un design inclusivo, è essenziale che ciò che può essere visto possa anche essere sentito, ascoltato, toccato o accessibile in qualche modo alternativo attraverso le sue modalità multisensoriali.
Gli oggetti virtuali in questione citati non possono essere semplicemente resi come una descrizione audio, ma devono tenere conto di aspetti come ritmo, tono, sorgente e persistenza per aiutare un utente non vedente a costruire un modello mentale accurato dell'ambiente. Ciò significa che l'HCI nell'ambiente immersivo deve essere riposizionata attorno all'utente, uscendo dal paradigma visivo e sfruttando il corpo come strumento cognitivo.

TECNOLOGIE ASSISTIVE E PERSONALIZZAZIONE DELL'INTERAZIONE

Negli spazi progettati per utenti con disabilità visive, l'HCI richiede livelli di adattamento dinamico. Ciò significa non solo alternative nei canali sensoriali disponibili per l'uso, ma anche il potenziale per la personalizzazione delle interazioni in base alle preferenze, alle capacità residue e all'alfabetizzazione tecnologica. Nello studio di Espinosa Castañeda et al. (2020), gli autori mostrano come i sistemi VR per l'apprendimento possano adattarsi in base al profilo dell'utente, fornendo maggiore supporto in modalità esplorazione e maggiore libertà durante la pratica. Questo studio suggerisce un elegante modello di interazione in cui il sistema interagisce in modo flessibile con l'utente, senza presupposti.

INTERAZIONE COME ESPERIENZA CORPOREA

Un ulteriore fattore in gioco nell'HCI inclusiva è il coinvolgimento corporeo. Nella realtà virtuale, il corpo non è solo un mezzo per inviare input (la mano che afferra un controller tattile), ma diventa parte integrante dell'esperienza e dell'apprendimento.
La teoria della embodied cognition (già richiamata al Capitolo 1) ci dice che non possiamo pensare alle nostre idee per concretizzarle: dobbiamo agire nel mondo per imparare. Questo principio è ora diventato fondamentale per pensare all'HCI per utenti non vedenti, dove il tatto e il movimento diventano i principali veicoli di comprensione.
Pensare alle interazioni in termini corporei significa dare valore a un diverso tipo di intelligenza e

presenza. Si tratta sia di una nuova soluzione tecnologica che di una nuova competenza progettuale che ne consentirà la realizzazione, pur rimanendo all'interno dell'impossibile dualità dell'inclusione. In questo progetto di tesi, le interazioni inclusive saranno esplorate attraverso l'uso di un dispositivo aptico e la costruzione di un ambiente museale VR accessibile, in cui il corpo dell'utente è il vero punto focale dell'esperienza e non solo un mezzo per navigare un'interfaccia.
La VR non viene utilizzata solo in contesti lavorativi o di studio ma, come anticipato, anche in contesti ludici, dove il suo potenziale immersivo viene testato in modo ludico. Sfortunatamente, la stragrande maggioranza delle applicazioni VR esistenti non è adatta agli utenti con disabilità sensoriali, in particolare a persone non vedenti o ipovedenti. Per colmare questa lacuna, diversi progetti hanno esplorato il potenziale dei giochi multisensoriali e degli ambienti virtuali che aggiungono stimolazione sonora e tattile per garantire che i giochi e le esperienze VR siano accessibili, coinvolgenti e significativi come già fatto cenno.
Il concetto di base dei giochi multisensoriali è molto semplice ma potente: se non si può vedere un oggetto, è possibile toccarlo, ascoltarlo, percepirlo nello spazio muovendo il corpo e sperimentandone le dimensioni grazie a un'attenta progettazione del feedback sensoriale. Il gioco diventa quindi un banco di prova immersivo per nuove interazioni inclusive, esperimenti su concetti spaziali e cognitivi e progettazione di esperienze per la rilevanza culturale.

GIOCARE SENZA VEDERE: SFIDE E APPROCCI

Progettare un gioco accessibile in VR richiede un vero e proprio cambiamento nel modo in cui gli utenti interagiscono. Un gioco progettato per un'esperienza multisensoriale non può semplicemente tradurre l'esperienza visiva in una descrizione verbale. Deve invece implementare percorsi percettivi alternativi che rendano spazio, profondità, orientamento e reattività altrettanto evidenti nello spazio virtuale quanto lo sarebbero in un tipico ambiente VR. Suoni direzionali, vibrazioni localizzate, suggerimenti tramite suoni relativi al movimento/collisione con oggetti nello spazio diventano essenziali per formare mappe mentali e mantenere il controllo del gioco.

Un progetto rilevante è il richiamato Virtual Showdown di Wedoff et al. (2019). Per questo progetto, tutti i giocatori erano giovani con disabilità visive. Interagivano con oggetti virtuali e nemici attraverso segnali verbali e feedback tattile. L'esperienza non è stata un'esplorazione rilassata, ma una sfida dinamica e coinvolgente che ha dimostrato che, se progettati correttamente, i giochi VR possono essere coinvolgenti e competitivi con un livello di coinvolgimento adatto a tutti gli utenti. I giocatori con disabilità visive hanno ottenuto punteggi simili a quelli dei coetanei non ipovedenti, in particolare quelli con un supporto verbale aggiuntivo o una struttura progressiva.

Remote Virtual Showdown: un gioco di realtà virtuale collaborativo per persone con disabilità visive
Reserchgate.net

APPRENDIMENTO ATTRAVERSO IL GIOCO: QUANDO L'INTERAZIONE MULTISENSORIALE DIVENTA EDUCATIVA

Il confine tra gioco e apprendimento diventa labile nella realtà virtuale. Molte applicazioni ludiche integrate in spazi educativi sfruttano aspetti multisensoriali per coinvolgere meglio gli utenti non in grado di vedere, garantendo accessibilità e significato durante il loro processo di apprendimento. Forme, volumi e profondità spaziale non diventano semplici concetti da credere o immaginare, ma vere e proprie scoperte quando possono essere percepite attraverso il corpo.
Nel loro articolo del 2020, Espinosa Castañeda et al. suggeriscono di utilizzare un sistema di realtà virtuale con feedback tattile per supportare l'apprendimento degli studenti non vedenti. Tra le altre ragioni che hanno portato alla scelta di interventi di realtà virtuale per il gioco educativo rivolto a studenti ipovedenti c'era la natura essenziale del miglioramento dei concetti geometrici/topologici attraverso interazioni significative. Il gioco non è solo divertimento, ma diventa un tipo di interazione tra l'utente e il gioco che lo aiuta a relazionarsi con il mondo circostante.

LIMITI E OPPORTUNITÀ

Il numero di giochi per ipovedenti e di altre applicazioni VR multisensoriali per utenti non vedenti rimane limitato, nonostante il crescente interesse. È possibile classificare i principali limiti dei progetti di gioco esistenti come:
• Limiti legati all'hardware: mancanza di standard accessibili per approcci come i guanti tattili;
• Limiti interpiattaforma: mancanza di interoperabilità tra piattaforme o dispositivi;
• Limiti di progettazione: mancanza di linee guida chiare per la progettazione inclusiva multisensoriale.
Eppure, queste tre aree sono esattamente quelle in cui questo progetto può apportare il massimo valore: un approccio innovativo ai problemi tradizionali che ripensa l'accesso inclusivo.
Nell'ambito della ricerca sull'accessibilità e sul design inclusivo, il termine "modellazione empatica" si riferisce all'insieme di approcci che consentono a progettisti e stakeholder di sperimentare, in modo più concreto, come una tecnologia o un ambiente viene percepito da persone con diverse abilità. Nel caso delle disabilità visive, in genere, ciò si traduce in "simulazioni": esperienze (brevi) che approssimano alcune condizioni percettive di ipovisione o cecità, cercando di scoprire barriere, attriti e dipendenze dalle informazioni visive.

VR COME "AMBIENTE DI TEST" PER L'EMPATIA PROGETTUALE

La VR viene utilizzata in quest'ambito perché consente di filtrare con estrema precisione ciò che l'utente percepisce e ciò che gli viene impedito di percepire: filtri di sfocatura, campo visivo ristretto, perdita di contrasto, occlusioni dovute all'abbagliamento o scenari in cui gli elementi chiave sono intenzionalmente difficili da riconoscere. In altre parole, "preparare il terreno" per ostacoli e compiti in modo ripetibile, consentendo di osservare dove cambiano le strategie di interazione e dove emergono punti critici.
Qui l'empatia non è fine a se stessa, ma una leva per individuare decisioni progettuali che riducano l'attrito (come l'affidamento a dettagli visivi, gerarchie informative poco chiare e mancanza di alternative multisensoriali). Oltre alle simulazioni, un'altra direzione di ricerca riguarda l'assunzione di prospettiva: vivere una situazione che induca a riflettere sulla posizione di una persona cieca/

ipovedente, senza dare per scontato che pochi minuti possano replicare un'esperienza di una vita. In questo senso, è utile distinguere tra "mettersi nei loro panni" (che può essere riduttivo) e "comprendere meglio come nascono le barriere".
Il lavoro di Heap et al. è un esempio in questa direzione: studia un'esperienza di realtà virtuale progettata per supportare la comprensione della prospettiva di persone non vedenti/ipovedenti in un contesto educativo e discute come l'immersione possa portare a particolari forme di consapevolezza e riflessione.
Ciò che è interessante, per una tesi di design, è che la realtà virtuale venga utilizzata come strumento di consapevolezza (per insegnanti/progettisti), non come alternativa all'ascolto dell'esperienza reale.
Per una tesi di design questo è un punto chiave: le simulazioni potrebbero essere utili come "innesco" per l'attenzione, ma non possono sostituire metodi più solidi (co-progettazione, interviste, test e valutazione degli utenti, revisione dei requisiti).

RISCHI: STEREOTIPI, PIETÀ, PAURA

Le simulazioni di disabilità possono avere effetti collaterali anche quando create con buone intenzioni. Diversi studi osservano che, anziché aumentare la disponibilità a interagire o ridurre lo stigma, alcune simulazioni aumentano i sentimenti di imbarazzo, ansia o "paura di diventare disabili" e possono rafforzare gli stereotipi.
Parallelamente, studi precedenti, spesso citati nei dibattiti su questo argomento, avvertono che tali attività possono alimentare pietà o un approccio più "medicalizzato" alla disabilità, anziché supportare la comprensione dei fattori ambientali e sociali che creano barriere.
Anche nell'HCI questo argomento è discusso tra gli studiosi: un articolo sull'accessibilità ai servizi da parte dei non vedenti, affronta criticamente l'utilizzo di simulazioni di disabilità nella formazione dei designer e sostiene la loro efficacia, mostrando come siano risorse controverse e non automaticamente "valide" per imparare a progettare in modo accessibile.
Il rischio maggiore per un progetto museale che includa l'accessibilità e il coinvolgimento delle persone ipovedenti è ridurre l'esperienza della disabilità visiva a un insieme di "aspetti mancanti", piuttosto che accogliere competenze, strategie e modalità di esperienza diverse ma valide.

IMPLICAZIONI OPERATIVE CHE EMERGONO DALLA LETTERATURA

Dalla convergenza di studi pro e contro emergono alcune regole per un utilizzo responsabile della VR come strumento di modellazione empatica.
Per un progetto di VR museale accessibile con dispositvo aptico, la modellazione empatica può essere collocata lungo queste linee come un valido strumento di supporto, utile per evidenziare dove l'esperienza museale VR si basa su elementi visivi (orientamento, riconoscimento delle opere d'arte, comprensione della scena) e giustificare la scelta di feedback alternativi (audio spaziale, gesti tattili/attici, guide narrative). Tuttavia, la letteratura suggerisce di mantenere una gerarchia chiara: l'empatia VR "emotiva" è un innesco per l'attenzione, mentre garantire una qualità inclusiva del progetto si basa maggiormente su requisiti, scelte multisensoriali e confronto con gli utenti (anche in forma leggera se il tempo è limitato), non basando l'intero progetto su una simulazione breve.

Fonti (passim):

1 GUERREIRO J. et al., *The design space of the auditory representation of objects and their behaviours in virtual reality for blind people,* volume 29, 2023.

2 ESPINOSA-CASTANEDA R. *et al., Virtual haptic perception as an educational assistive technology: a case study in inclusive education,* volume 14, 2021.

3 COLWELL C. et al., Haptic virtual reality for blind computer users, 1998.

4 WEDOFF R. et al., *Virtual Showdown: An Accessible Virtual Reality Game with Scaffolds for Youth with Visual Impairments,* 2019, paper 141.

5 ZAAL T., et al., *Toward inclusivity: Virtual reality museums for the visually impaired, 2022, IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR),* CA, USA, 2022, pp. 225-233.

6 *https://medium.com/visionari/la-mostra-che-rende-larte-accessibile-ai-non-vedenti-con-la-realt%C3%A0-virtuale-9da251d6ab72.*

7 WILSON M., *Six views of embodied cognition,* 2002, volume 9.

8 KREIMEIER J. et al., *Two Decades of Touchable and Walkable Virtual Reality for Blind and Visually Impaired People: A High-Level Taxonomy,* volume 4, 2020.

9 HEAP T. et al., *Experiencing Virtual Reality for Perspective-Taking of Blind and Visually Impaired Learners,* 2023.

03

Analisi dello stato dell’arte

3.1 Musei e VR: accessibilità attuale

Negli ultimi anni, i musei hanno iniziato a considerare l'accessibilità non solo in termini di "funzionalità aggiuntive", ma come parte della qualità complessiva dell'esperienza. In termini pratici, l'accesso alle collezioni museali per le persone non vedenti o ipovedenti è spesso mediato: audioguide, display braille, percorsi tattili o repliche sono funzionalità preziose, ma spesso non integrate in un'esperienza fluida. Allo stesso tempo, la realtà virtuale è emersa come una potenziale opportunità: non per "sostituire" l'esperienza museale, ma per ampliare le modalità di fruizione, consentendo di esplorare sia le opere che gli spazi in modi precedentemente impensabili.
In primo luogo, la realtà virtuale può fornire accesso remoto a collezioni e spazi che musei e istituzioni stanno sperimentando in ambienti virtuali, riducendo le barriere legate agli spostamenti e alla posizione fisica. In generale, sebbene le esperienze virtuali possano sembrare più inclusive, non necessariamente lo sono. Se un'esperienza virtuale traduce una visita museale con la stessa affidabilità visiva di un percorso tradizionale (caratteri piccoli, menu complessi, navigazione visiva), allora rischia una nuova forma di esclusione digitale.
In una seconda linea di impatto, più vicina all'intento di questa tesi, ci sono le esperienze VR create per un coinvolgimento multisensoriale in cui l'accessibilità è costruita attorno a canali alternativi quali audiolizzazione dello spazio, narrazione guidata, feedback tattile/aptico. Relativamente

Touching Masterpieces
Galleria Nazionale di Praga

a questa linea di indagine, si colloca l'articolo di Zaal et al. che indaga se narrazioni, audio di riferimento spazializzato e feedback aptico possano sostituire credibilmente la visione in un museo VR. Il confronto avviene tra una versione "standard" e una progettata per utenti non vedenti/ipovedenti, mentre la conclusione è che un approccio audio-aptico crea una navigazione e una comprensione più pertinenti per l'esperienza museale.
Rispetto a questo progetto di tesi, il valore di questo caso di studio non deriva dalla tecnologia in sé, ma dal messaggio di implementazione: l'accessibilità funziona quando è la struttura dell'esperienza (come ci si naviga, come si riconosce un'opera, come si capisce "dove ci si trova"), invece di un flusso di "commenti audio" marginali al processo.
Guardando ancora più indietro, una delle esperienze più citate è The Museum of Pure Form ((Loscos et al., 2004), che ha esplorato la possibilità di "toccare" statue in un museo VR con un dispositivo tattile dedicato per ricreare forme precedentemente digitalizzate ed esplorabili in 3D.
L'esperienza di Praga rispetto al progetto di questa tesi ha un valore quasi "fondamentale" per le esperienze museali VR accessibili: dimostra che il tatto può diventare un linguaggio di coinvolgimento artistico. Tuttavia, rivela anche una limitazione frequente nei progetti tattili: i tentativi di alta fedeltà richiedono hardware sofisticato, non facilmente scalabile in contesti museali o domestici tradizionali. Per recuperare il tempo perduto, la ricerca attuale cerca di colmare il divario tra prototipi ad alta fedeltà e soluzioni realizzabili. Uno di questi studi è incentrato sulla co-progettazione di un'applicazione museale virtuale con un'interfaccia tattile in cui persone non vedenti/ipovedenti venivano coinvolte nelle decisioni di coinvolgimento degli utenti, basate su decisioni relative ai contenuti e feedback tattile/uditivo
La chiave qui è il "coinvolgimento". Non è sufficiente progettare una realtà virtuale "per" utenti non vedenti/ipovedenti ma è fondamentale interagire con loro, anche attraverso sforzi di ricerca a breve termine, nel caso in cui vengano formulate ipotesi errate (opzioni di feedback generiche, metafore sonore senza senso e tempi di interazione irrilevanti).
Sul fronte delle soluzioni "ibride" (fisiche/digitali), alcuni musei stanno esplorando strumenti di assistenza per ipovedenti che supportano operazioni di percezione residua uniche durante le visite, con applicazioni che consentono la configurazione di misure di contrasto, luminosità e distanza, riducendo al minimo l'affaticamento degli occhi durante il processo e migliorando la capacità di lettura delle opere esposte.
In relazione al progetto e alla proposta di tesi, è importante che questi si prestino a un concetto molto importante: l'accessibilità non riguarda solo la sostituzione della vista (audio/tattile), ma anche il supporto all'affidamento ai sensi esistenti quando disponibili. Nell'ottica della realtà virtuale, suggerisce esperienze combinabili.
In definitiva, le tendenze attuali mostrano un aumento dell'accessibilità museale, ma anche vulnerabilità esistenti: affidamento su interfacce visive sia nell'interazione con le opere esposte che nell'utilizzo delle app senza una chiara standardizzazione dei modelli multisensoriali, affidamento su interfacce tattili non universali o scalabili. Pertanto, queste carenze sono ciò che questa tesi suggerisce come area di crescita: creare un'esperienza museale in realtà virtuale in cui l'audio e il tocco non siano "alternative di emergenza", ma piuttosto il linguaggio primario attraverso cui l'opera diventa coinvolgente e memorabile.

Touching Masterpieces
Galleria Nazionale di Praga

3.2 Barriere comuni nelle esperienze visive

Se un'esperienza digitale nasce "per essere vista", la percezione visiva è più di un canale tra gli altri: è la spina dorsale dell'interazione. Questo è ancora più vero nel caso della realtà virtuale, dove l'orientamento, la comprensione spaziale e il riconoscimento degli oggetti sono spesso delegati a segnali visivi costanti (icone, evidenziazioni, testi, minimappe, indicatori direzionali). Per gli utenti non vedenti, queste scelte progettuali diventano facilmente barriere, non perché "non ci sia alcuna funzione", ma perché l'esperienza si basa su premesse percettive non condivise.
Una delle barriere più comuni è la navigazione: molte esperienze VR guidano gli utenti "nel luogo" attraverso frecce, punti luminosi, indicatori sovrapposti o mappe. Se non c'è altro modo per capire dove andare e cosa fare, un utente non vedente non ha alcun riferimento e un utente ipovedente può stancarsi rapidamente o perdere informazioni cruciali. In un museo virtuale la situazione peggiora ulteriormente: il percorso diventa un "corridoio di suggerimenti visivi" e la fruizione delle opere d'arte dipende dalla loro localizzazione sullo schermo. La ricerca sui musei VR accessibili mostra che l'aggiunta di audio spaziale e feedback alternativi aumenta proprio questa capacità di localizzare e raggiungere gli oggetti di interesse.
Un secondo blocco riguarda testi e pannelli. Nella VR è comune inserire descrizioni come finestre, tag o popup. Se non sono solo aggiunte decorative, ma strumenti basilari per accedere alle conoscenze richieste in un sistema di riferimento, per gli utenti ipovedenti leggere in VR diventa faticoso e raramente gratificante mentre per gli utenti non vedenti è semplicemente impossibile senza un'alternativa. Le norme sull'accessibilità web (WCAG) insistono sulla generazione di informazioni percepibili e alternative non visive equivalenti alle informazioni non accessibili: sebbene questo principio sia nato nelle esperienze 2D, viene applicato anche agli ambienti immersivi.
Molti oggetti nella realtà virtuale sono "significativi" perché assomigliano a qualcosa del mondo reale: una manopola sembra una maniglia, un dipinto sembra un'opera d'arte, un pulsante sembra un pulsante. Ma anche in questo caso, il riconoscimento è solitamente visivo. Senza un feedback alternativo (audio o tattile), l'utente non vedente può trovarsi di fronte a due problemi: non sapere che qualcosa esiste e non capire cosa sia o cosa faccia. La letteratura sulla rappresentazione uditiva di oggetti e comportamenti negli ambienti VR sottolinea come l'audio possa conferire identità e funzione agli elementi dell'ambiente circostante, ma sottolinea anche che la scelta delle metafore sonore e la coerenza del feedback devono essere progettate.
In molti casi, l'utente nella realtà virtuale seleziona qualcosa guardandolo, puntandolo con un controller o "collegandolo" tramite griglie e puntatori. Spesso il sistema conferma con lievi modifiche visive (cambio di colore, contorno, animazione). Per chi non può vedere, non c'è alcuna conferma, per chi ha problemi di vista, potrebbe essere troppo sottile. Anche in questo caso, non c'è una vera e propria barriera all'interazione, ma una mancanza di feedback che confermi tre momenti cruciali: "Sono nel bersaglio", "Ho selezionato" e "L'azione è avvenuta". La ricerca sul feedback tattile/aptico nella realtà virtuale mostra che vibrazioni e segnali fisici sostituiscono o rafforzano le conferme.

Un ultimo elemento trasversale è il sovraccarico cognitivo. Quando l'ambiente non fornisce segnali utili per l'orientamento, l'utente deve compensare ricordando i percorsi, provando azioni per scoprirle per tentativi ed errori e chiedendo assistenza. In un museo virtuale, questo trasforma un'esplorazione piacevole in un compito faticoso con scarsa assistenza. Ecco perché gli approcci più efficaci non si concentrano solo sul "rendere accessibile un contenuto", ma progettano anche l'esperienza in modo che l'utente capisca cosa sta succedendo e possa orientarsi costantemente.
I lavori di co-progettazione con utenti non vedenti/ipovedenti in esperienze museografiche hanno mostrato quanto possa essere sfumata la qualità dell'esperienza. Piccoli dettagli su tempistiche, feedback o ripetizione di un'indicazione e la chiarezza delle possibili azioni possono fare la differenza tra un'esperienza gratificante o faticosa.
Le barriere comuni nelle esperienze visive non sono solo "non esiste una soluzione tecnica": sono una conseguenza diretta di un approccio progettuale che considera la vista l'unico linguaggio di interazione.

3.3 Elementi di successo e criticità rilevate

Una volta considerate le esperienze e le soluzioni esistenti, è abbastanza facile tracciare un modello. Ciò che sembra avere successo nel caso della realtà virtuale per utenti non vedenti e ipovedenti non è "aggiungere l'accessibilità" alla fine, ma ripensare l'esperienza da zero. Analogamente, ciò che si riscontra in molti dei progetti di maggior successo rivela modelli problematici, spesso dovuti a limiti tecnologici, scelte di interazione non mature o mancanza di standard comuni.
L'elemento vincente è l'accessibilità come scelta "strutturale". Orientamento, esplorazione e comprensione non sono limitati a un singolo canale (la visione), ma si estendono a diverse modalità sensoriali. Nel caso dei musei VR per persone non vedenti e ipovedenti, l'aggiunta di audio spazializzato e feedback tattile alternativo non funziona per l'esperienza d'arte in sé, ma per le azioni preliminari che rendono possibile l'esperienza museale (capire dove ci si trova, trovare un'opera d'arte, raggiungerla). I progetti vincitori costruiscono un linguaggio appropriato: suoni e segnali tattili non sono casuali, ma coerenti e ripetibili. Quando un particolare tipo di feedback tattile trasmette sempre lo stesso messaggio (ad esempio "sei vicino a un'opera d'arte", "sei nel punto giusto", "azione completata"), l'utente crea fiducia e si sente più autonomo. In questo senso, la ricerca sulla sonificazione di oggetti e comportamenti nella VR mostra che l'audio può diventare un'interfaccia vera e propria, ma solo se deriva da una logica identificabile anziché da una descrizione vocale. Un elemento vincente è l'ascolto degli utenti non vedenti e ipovedenti durante la progettazione. Quando gli utenti sono coinvolti, emergono esigenze che non sono immediatamente visibili a un progettista vedente: tempi di esplorazione diversi, necessità di ripetere le indicazioni, preferenze personali per il feedback, bisogno generale di "conferma" delle azioni. Il lavoro di co-progettazione nei musei VR con interfacce touch dimostra che lo scambio di appunti e idee contribuisce a migliorare l'esperienza e riduce i casi di "accessibilità" teorica che risultano meno fruibili nella realtà. Ovunque sia possibile, l'aptica crea valore aggiunto quando consente un'esplorazione attiva. Non si tratta di una vibrazione generica, ma di un feedback tattile pertinente che aiuta a comprendere forme, contorni, distanze o contatti. Progetti innovativi in contesti museali dimostrano che il "tocco" nella VR trasforma la fruibilità di un'opera d'arte in un'esperienza anziché in una spiegazione. L'elemento più problematico riguarda la scalabilità. Molte soluzioni tattili ad alta fedeltà sono legate a dispositivi costosi, ingombranti o difficili da integrare in contesti reali (museo, scuola, casa), anche quando l'esperienza è coinvolgente ma non all'altezza delle installazioni. Questo vale anche per i progetti più famosi nei musei virtuali, che mostrano un grande potenziale ma richiedono hardware dedicato. Che qualsiasi vibrazione o qualsiasi suono sia "accessibile" è un'idea sbagliata comune. Se il feedback non veicola informazioni (non distingue gli oggetti, non chiarisce l'azione eseguita, non aiuta l'orientamento), può facilmente trasformarsi in rumore o aumentare il carico cognitivo. Poiché la letteratura sulla sonificazione in VR è scarsa, è ancora più importante essere cauti: ciò che funziona per un utente può essere confuso per un altro e questo significa che le scelte devono essere valutate attentamente e che le opzioni di personalizzazione devono essere rese disponibili. Molte esperienze VR iniziano visivamente e vengono adattate in

seguito. In questi casi, l'accessibilità è "superficiale" (una descrizione audio, un menu semplificato), ma la logica di interazione approfondita rimane visiva: obiettivi da guardare, percorsi contrassegnati da frecce, solo conferme grafiche. Il risultato è che l'utente non vedente può accedere alle informazioni, ma ha difficoltà a vivere un'esperienza vissuta che funzioni in modo autonomo. Il confronto tra versioni standard e versioni inclusive dei musei VR mostra proprio questo punto critico tra "aggiunta" e "progettazione". Infine, un limite trasversale è che non esistono standard consolidati per l'accessibilità in VR. Le linee guida web (WCAG) stabiliscono regole per il suono, ma non comprendono la logica complessa di un ambiente immersivo. Ciò significa che i progetti sono più variabili a seconda di chi li realizza e meno replicabili. Ecco perché gli sforzi per l'accessibilità XR stanno iniziando a prenderla in considerazione senza avere ancora qualcosa di consolidato; questo significa che si stanno cercando pratiche relativamente comuni per renderle trasferibili.
In termini generali, mentre gli elementi di successo puntano verso direzioni concrete e riconoscibili (accessibilità come fondamento, linguaggio multisensoriale coerente, feedback informativo con coinvolgimento dell'utente), gli aspetti critici mostrano dove il progetto di questa tesi potrebbe posizionarsi realisticamente: aspirare ad una soluzione di documentazione e progettazione credibile, valorizzando al contempo l'audio e il tatto, ma senza affidarsi a tecnologie irraggiungibili, costruendo un'esperienza museale in cui l'inclusione non sia solo un'etichetta per una qualità progettuale non ancora testata.
L'analisi della letteratura di casi simili ha definito le linee di indirizzo per il progetto di tesi. Le questioni più importanti su cui basare il lavoro coglie alcuni aspetti essenziali di cui non si può assolutamente fare a meno: l'accessibilità non è mai un semplice adattamento del progetto ma una coerenza progettuale che si traduce in usabilità, posizione e qualità dell'esperienza.
Quando si considera uno spazio in VR per persone non vedenti la prima preoccupazione è l'orientamento. Nelle soluzioni può sofisticate la navigazione viene costruita attraverso segnali alternativi come audio spaziale, inviti di prossimità o conferme delle azioni intraprese.
Nelle esperienze museali progettate per persone cieche o ipovedenti la combinazione di feedback audio e non visivo contribuisce alla capacità di orientarsi in uno spazio con opere e punti di interesse. Il design anticipa la costruzione di una narrativa di orientamento primario con segnali chiari e limitati la cui funzionalità verrà discussa e verificata grazie al riscontro con il Museo Omero considerato il fatto che opera con percorsi tattili e di mediazione.
Accanto all'orientamento troviamo l'acustica. Il suono e la dimensione sonora devono raccontare l'opera diventando interfaccia vera e propria da cui trasmettere direzione, distanza, prossimità ed elementi di status di un'opera. Il sound design può fornire identità e funzionalità alle opere in ambiente VR se costruito con consapevolezza e coerenza. Nel progetto di tesi verrà distinto l'audio funzionale legato all'orientamento all'interno della realtà virtuale e al feedback, dall'audio culturale che invece si occupa dei contenuti narrativi ed artistici e che non viene tenuto in condiderazione per la realizzazione del prototipo.
Il terzo aspetto su cui verterà il progetto di tesi è il tatto e l'aptica. Il feedback aptico è considerato di per sé un rumore ma se diventa informatico può supportare l'esplorazione e la comprensione dell'opera restituendo confini, spigoli e punti di interesse. Progetti in VR con aptica integrata confermano la potenza dell'idea di "toccare". Garantire una lettura aptica affidabile e leggibile,

modellando l'esperienza con l'aiuto del Museo Omero, è utile per discernere le parti un'opera ma anche per una lettura tattile e quali mezzi usare per renderli fruibili.
Nella ricerca dello stato dell'arte ci si rende conto che alcuni progetti falliscono perché la disabilità visiva viene considerata come un impedimento omnicomprensivo, in realtà, sensibilità, abitudini, preferenze e interazione persistenti variano. Persino alcune soluzioni per soggetti ipovedenti rivelano che contrasto, ingrandimento e leggibilità fanno la differenza in contesti culturali. In una soluzione di VR questo si traduce in esperienze personalizzabili partendo da opzioni limitate ma realmente efficaci, in grado però di unificare l'esperienza senza complicare l'interfaccia.
Il tema trasversale che attraversa gli aspetti analizzati, spesso sottovalutato, è la chiarezza dell'azione. Nell esperienze VR tradizionali, molte conferme sono fornite da micro-azioni visive. Nella VR inclusiva questa parte deve essere chiara con passaggi del tipo: "sei nel punto giusto", "selezione completata", "azione completata", "errore". La ricerca sul feedback multisensoriale considera vibrazioni e segnali audio elementi di perfezionamento dell'interazione quando la vista non può essere utilizzata.
La letteratura analizzata supporta la nozione di investimento: progettare per persone cieche o ipovedenti rende le scelte di progetto pertinenti evitando futili metafore sensoriali.
Gli elementi su cui si è discusso si uniscono per stabilire il fatto che non può esistere un museo VR accessibile come "traduzione" di una mostra vista con gli occhi. Deve essere un'esperienza multisensoriale per nascita e definizione con un orientamento coerente con la costruzione audio-tattile stabile.

Fonti (passim):

KREIMEIER J. et al., *Two Decades of Touchable and Walkable VR for Blind and Visually Impaired People: A High-Level Taxonomy*, 2020.
LAHAV O. et al., *A virtual environment for people who are blind—A usability study. Journal of Assistive Technologies.* 2012.
LAHAV O. et al., *Rehabilitation program integrating virtual environment to improve O&M skills... (BlindAid)*, 2015.
LAHAV O., *VR Systems as an Orientation Aid for People Who Are Blind to Acquire New Spatial Information*, 2022, 22 (4), 1307.
HARDWICK A. et al., *Tactile display of virtual reality from the World Wide Web - a potential access meth-od for blind people*, 1998.
PACCHIEROTTI C. et al., *Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives*, 2017.
MASSIE T. et al., *The PHANToM Haptic Interface: a Device for Probing Virtual Objects Available to Purchase*, 1994.
LÉCUYER A., *Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback*, 2009.
C. LOSCOS et al., *The museum of pure form: touching real statues in an immersive virtual museum, 2004, VAST'04: Proceedings of the 5th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, pag. 271 – 279.
COLWELL C. et al., *Haptic virtual reality for blind computer users, 1998.*
GUERREIRO J. et al., *Design Space of the Auditory Representation... for Blind People, volume 29, 2023.*
WEDOFF R. et al., Virtual Showdown: An Accessible VR Game..., 2019.
THEVIN L. et al., *Inclusive Adaptation of Existing Board Games for Gamers with and without Visual Im-pairments using a Spatial Augmented Reality Framework for Touch Detection and Audio Feedback*, 2021.
WIELAND M. et al., *Towards Inclusive Conversations in VR for People with Visual Impairments, 2022.*
WU Q. et al., Vipins: pin array + vibrotactile for shapes/textures, 2025.
HERRERA F. et al., *Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking*, 2018.
MARTINGANO A. et al., *VR improves emotional (non cognitive) empathy: meta-analysis, 2021.*
ZAAL T. et al., Toward inclusivity: Virtual reality museums for the visually impaired, 2022, IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR), CA, USA, 2022, pag. 225-233

04

Dall’analisi al progetto

4.1 Requisiti e bisogni emersi

Nei capitoli precedenti sono emersi limiti nelle esperienze di realtà virtuale ma anche indicazioni generali su ciò che rende un'esperienza accessibile e credibile per ciechi e ipovedenti. Sono emersi di continuo riferimenti al canale visivo, al feedback, al disorientamento e all'impossibilità di personalizzare le esperienze.
Da questo momento le esigenze progettuali verranno trasformate in proposte pratiche. La collaborazione con il Museo Tattile Statale Omero di Ancona, punto di riferimento del territorio nel mondo museale multisensoriale, darà le opportune direzioni progettuali grazie alla consolidata esperienza nel mondo delle persone cieche o ipovedenti.
Il primo bisogno da applicare a qualsiasi esperienza immersiva è l'autonomia. Un'esperienza in VR può essere bella e immersiva ma se l'accesso richiede che altri utenti entrino di continuo per capire ciò di cui l'utente ha bisogno o dovrebbe fare, l'esperienza diventa frammentaria e non immersiva. Esiste perciò un bisogno di orientarsi in autonomia sotto forma di direzione multimodale. Per evitare confusione, il sistema prevede che la fruizione avvenga da seduti in modo tale da evitare il disorientamento che porterebbe ad un eccesso di distrazione.
Oltre all'autonomia bisogna far capire com'è fatto l'ambiente, cosa che in un ambiente virtuale non può essere dato per scontato. L'acquisizione dell'ambiente per persone cieche o ipovedenti deve passare attraverso altri canali. Ed è qui che emerge un requisito essenziale: tutto quello che può o deve essere riconosciuto all'interno dell'esperienza in VR necessita di una qualche forma di identificazione non visiva ma uditiva, tattile, multimodale. In un'applicazione artistica vale sia per le opere d'arte che per l'interazione.
A volte le cose non funzionano come dovrebbero non perché non ci siano elementi uditivi o vibrazionali ma perché vi è una sovrapposizione linguistica tra i segnali, questo perché sono troppo simili o arrivano tardi. Consideriamo la coerenza come un requisito: pochi segnali ma sempre chiari da interpretare. Avere una chiarezza e coerenza di feedback fa sì che le persone si fidino dell'esperienza.
Considerata la necessità di avere l'audio sia come contenuto funzionale che contenuto culturale, bisogna considerare una compartimentazione e gerarchizzazione dei canali informativi per impedire agli utenti di godere sì dell'opera d'arte ma senza però rimanere senza il contesto nel corso dell'utilizzo.
Un'altra esigenza di progetto che merita particolare attenzione riguarda la personalizzazione. "Ipovedenti" non è un termine universale ma abbraccia una vasta gamma di situazioni completamente diverse tra loro. Esiste per questo l'esigenza di flessibilità: l'esperienza deve essere regolabile con poche funzioni fondamentali senza renderla eccessivamente lunga per via dell'ampia personalizzazione. L'obiettivo è di consentire la preferenza senza rendere eccessiva l'esperienza di personalizzazione ancor prima di iniziare.
Infine, emerge un'esigenza legata alla verificabilità dell'azione. Nella maggior parte dei sistemi VR il feedback viene visualizzato; nelle esperienze inclusive bisogna sincerarsi che i passaggi siano

verificati. Questo garantisce all’utente la sicurezza di sapere dove si trova, di fare il controllo e di sapere cosa succede in un determinato momento. Esistono una serie di sequenze di notazione del feedback che diventano chiare per ogni interazione significativa, in modo tale che l’utente non debba indovinare cosa succede intorno.

4.2 Obiettivi del progetto e concept

Le principali intuizioni progettuali provengono, quindi, da evidenze emerse dalla ricerca e quindi, il tema di progetto è un consolidamento che culmina con un'ideazione valutabile, realizzabile e proponibile in contesto museale. Si parla, quindi, non di una proof of concept o dimostrazione tecnologica, ma di allestimento in VR museum realizzabile che prima di tutto è accessibile ad utenti ciechi e ipovedenti e, in secondo luogo, trae giovamento da invenzioni qualitative estetico/narrative che preservano la qualità dell'esperienza culturale. Infatti, la VR è vissuta come un mezzo capace di potenziare l'accesso all'arte non replicando in digitale una fruizione pensata per il visivo, quanto piuttosto, una fruizione in cui sound, touch and motion sono i primi linguaggi di accesso e relazione con l'opera.
Le finalità generali si possono ricondurre a tre dimensioni complementari. La prima è l'accessibilità funzionale, cioè l'accesso reale all'orientamento, contestualizzazione, selezione ed esplorazione delle opere e finalizzare le azioni principali senza necessità di risposta di un operatore a conferma visuale. La seconda è la qualità culturale dell'esperienza, cioè l'idea di fornire un incontro con l'opera che non può essere ridotto a mera analisi tecnica, artigianale, estetica o semplice sequenza d'azioni, ma il cui rispetto acquista un tempo giustificato e una narrazione coerente. La terza è la replicabilità del progetto: ci accingiamo, sebbene sia una tesi, a ideare una progettazione che potrebbe essere riproposta e declinata da chiunque, evitando scelte troppo dipendenti da singolo dispositivo o singolo scenario.
In questo contesto di obiettivi, ci si attiene a un tour immersivo dei sensi in grado di appellarsi all'operato di singole opere. L'ambiente virtuale è concepito come uno spazio safe e leggibile affinché l'utente si possa muovere al suo interno senza preoccupazioni di impattare o di perdere il proprio orientamento e affinché gli oggetti dell'attenzione siano riconoscibili attraverso una grammatica di segnali non visivi. In questo contesto, l'arte non viene percepita come oggetti da tenere d'occhio da lontano, quanto come presenza a cui avvicinarsi con il tatto per investigarne i suoi caratteri. L'opera viene resa esplorabile attraverso due principali strumenti: audio spaziale e feedback tattile/aptico garantito da un dispositivo. A supporto di questa posizione c'è il Museo Tattile Statale Omero di Ancona: essendo questo museo per definizione e prassi, un contesto culturale in cui i mediatori tattili non sono una mera eccezione ma una forma strutturata di accesso, esso è un museo di riferimento collegato a questo nuovo approccio alla conoscenza affinché la dimensione aptica non sia scambiata per semplice "effetto tecnologico".
Il dispositivo, quindi, ha un ruolo specifico nel concept: non nello sforzo di riprodurre ogni minima unità fisica dell'opera, quanto nel recupero di dati di senso. Infatti, in particolar modo, il feedback tattile è generato a supporto della percezione dalla quale si necessita di costruire una rappresentazione mentale: contorni, cambi di superficie, dettagli, proporzioni e passaggi "cruciali" della forma. L'aptica opera in sinergia con l'elemento sonoro: il racconto può supportare il percorso suggerendo dove orientare la mano, laddove il linguaggio tattile conferma la presenza degli elementi e le loro morfologie. L'approccio multicanale è un aspetto cruciale dell'esperienza: riduce la necessità del racconto testuale e qualifica ciò che l'utente fa come operazione interpretativa.

Un aspetto importante del concept è la differenza dell'audio nelle sue accezioni informative e culturali. L'audio informativo è utile in termini di orientamento, quindi per una interazione fiduciosa (segnali, conferma di accesso alle opere, conferma della posizione dell'utente); quello culturale accompagna l'intera esperienza con l'opera: racconta il setting, fornisce letture sul significato, crea atmosfera e ritmo. Mantenere le due dimensioni distinte evita il sovraccarico e soprattutto il rischio che visitare diventi una costante valanga di informazioni indefinite. Si preferisce che l'utente possa assaporare l'opera in continuità con pause in cui può fare ciò che desidera.
Infine, per quanto riguarda la personalizzazione, l'impatto visivo (nel caso di ipovedenti) non è una condizione unica ma variegata con preferenze da sensibilità al suono a preferenze per tecnologie immersive. Per questo motivo si registra questa esperienza con poche impostazioni sensate e minimamente invasive: volume dell'audio guida, se richiesto, livello di assistenza nella guida del movimento per esplorare ed eventualmente priorità dei segnali funzionali o narrativi, volume o genere del feedback aptico. La personalizzazione non dovrebbe aumentare la complessità ma dare una modulazione minima per rendere l'esperienza più confortevole e personalizzata per tutte le varie tipologie d'utenza.
In sintesi, il progetto si propone come idea realizzabile tramite museo VR accessibile secondo tre punti chiave: (1) accessibile come premesse della fruizione; (2) multisensorialità come linguaggio culturale mentre suoni e tatto creano comprensione e presenza; (3) approccio realistico e replicabile dove il dispositivo aptico e l'ambiente VR sono progettati per comunicare informazioni cruciali in modo coerente. Il Museo Omero fornisce il riferimento per mantenere tale idea legata alla pratica museale, indirizzata e inclusiva, poiché deve esserci un focus sul quale l'arte non "spiega" ma offre opportunità di esplorazione, riconoscimento e ricordo, in termine esperienziale.

4.3 L'idea: esplorare l'arte tramite un dispositivo aptico in VR

Il progetto è basato sull'idea di poter attuare una fruizione artistica in VR, che non parta dalla vista (canale di attivazione principale) ma da un'esperienza esplorativa e multisensoriale che possa, tramite un dispositivo aptico, diventare tangibile nella percezione dell'opera. Poiché in un museo reale l'opera è sempre recintata, teche, distanze e divieti di tocco e di compromissione generano una fruizione a distanza e separata dall'esplorazione fisica: quindi un'esperienza artistica estremamente sbilanciata a favore della vista. Per soggetti ciechi o ipovedenti si crea un paradosso: l'opera c'è, e non c'è, nella sua corporeità. L'ipotesi del progetto è che la VR possa consentire di attutire parte di questa resistenza senza raccontare l'opera ma consentendo di fare, con l'ascolto e il tatto, un apprendimento della medesima mediante la funzione intellettiva.
In tal senso il dispositivo aptico entra in ballo come canale attraverso cui veicolare informazioni tattili utili nel percorso esplorativo e non come gadget tecnologico. Non si tratta di ricreare l'effetto stoffa dell'opera reale (cosa altamente problematica e difficile da scalare) ma di dare un feedback leggibile, sensato e funzionale alla comprensione: ci sono i contorni, i piani che cambiano, i passaggi significativi, le note strutturali. Si tratta, infatti, di consentire attraverso il tatto che l'opera sia non solo percepita ma ricomponibile nella tessera mentale come cosa, tramite sequenze tattili: si segue la linea, si trova la curva, il punto di discontinuità, si percepiscono le proporzioni e i giusti rapporti delle parti.
Si discute quindi dell'esperienza in cui l'opera è un "incontro" e non un "oggetto lontano". L'utente entra in un percorso virtuale predisposto per essere leggibile e fruibile; ciò che lo porta ad avvicinarsi all'opera è un sistema di orientamento totalmente non visivo: indicazioni attraverso vibrazioni, quali conferme chiare del movimento messo in atto. Una volta vicini all'opera, infatti, il dispositivo è il canale prevalente di esplorazione. La mano può muoversi sulla superficie virtuale e guadagnare feedback aptici che rendono comprensibili diverse parti della compagine finale dell'opera. Si tratta quindi di una fruizione attiva e non passiva: non si ascolta solo ma si "esplora" tramite un gesto, una linea, un tempo.
Perché questa scoperta possa davvero avere senso, emerge la necessità che l'aptico venga configurato come un linguaggio. L'utente impara a tracciare nel tempo il linguaggio per acquisire autonomia e responsabilizzazione. Se la risposta è eccessivamente ricca o variabile, rischia di generare confusione e aumentare il carico cognitivo, problematico per chi già non gode di un supporto visivo statico (più o meno completo). La scelta progettuale si orienta, a discapito della ridondanza, alla semplicità: pochi segnali ma chiari.
In aggiunta, il dispositivo non lavora da solo. L'audio è supplementare e se ben orchestrato diventa un grande ausilio nella formazione del senso. A partire da un certo punto, infatti, la vibrazione posta sulle estremità del sistema guida e conferma: dice dove andare, quanto è distante da qualcosa, se ha preso qualcosa o se ha sbagliato o è terminato. Dall'altra parte c'è l'audio (a richiesta) che viaggia assieme all'opera. Non si vuole che la narrazione faccia il lavoro sporco dell'esperienza: l'audio non deve sostituirsi ma consapevolmente accompagnare l'esplorazione quale ausilio.

Uno dei punti aggiunti di valore del progetto è quello relativo alla fruizione nello spazio. Il raccordo con il Museo Tattile Statale Omero di Ancona conferisce probità all’idea progettuale e orienta verso una fruizione artistica valida e da non sottovalutare la modalità tattilo-universale. Si tratta di una realtà fondamentale perchè rende l’esperienza coerente con ciò che esiste di inclusivo: selezionare cosa rendere percorribile, rendere intelligibili limitazioni e pretese tramite una mediazione tecnologica.
In conclusione, il poter esperire le opere tramite dispositivi aptici in VR porta dal piano della possibilità all’accessibilità creativa: non “mettiamo qualcosa” a giro nel tentativo di sostituire la visita visiva ma creiamo fruizioni esperienziali diverse all’interno di una grammatica coerente multi sensoriale. La VR diventa quindi un contenitore nel quale le opere possono avvicinarsi senza pericoli di conservazione, possono essere “toccate” attraverso un diaframma, possono essere comprese senza trasformarsi in parole o spiegazioni. Il dispositivo è quello che rende l’interazione di facile possibilità, come strumento chiaro e trasparente grazie al quale l’opera diventa esplorabile, memorizzabile e soprattutto accessibile, ossia, intellegibile.

4.4 Scelte tecnologiche, approccio progettuale e inclusività come fondamento

La scelta delle specifiche tecnologiche è connessa alle esigenze direttamente connesse: accessibilità, comprensione senza feedback visivo e replicabilità in diversi contesti. Il progetto VidMentis parte con una versione minima prototipale praticabile su un dispositivo indossabile.
L'idea di base non è di produrre fedelmente l'opera ma un'esplorazione che possa essere sia un'esperienza fisica ma anche piacevole. Non rappresenta l'oggetto materiale ma piuttosto dati sensoriali leggibili e intenzionali come contatto, pressione, texture e prossimità, per creare un'immagine mentale di ciò che sarebbe l'oggetto in uno spazio virtuale
In un contesto di design inclusivo, non si cerca di impressionare l'utente quanto piuttosto di dare senso. Il dispositivo fornirà segnali relativamente semplici ma traducibili e apprendibili, per facilitare l'apprezzamento culturale. La collaborazione con il Museo Omero fornirà supporto come fonte legittima di analisi e valutazione dell'opera.
La versione prototipale di VidMentis prevede il movimento sull'indice e pollice. La presa a "pizzico" con le due dita permette di testare tre tipi di consapevolezza: interazione puntata, percezione volumetrica e scorrimento lungo una superficie.
Dal punto di vista costruttivo, il prototipo si basa su un approccio parzialmente esoscheletrico-robotico morbido: un guanto in tessuto con componenti meccanici e guide che supportano il movimento senza irrigidire eccessivamente la mano. Gli elementi più pesanti verranno posti sull'avambraccio per dare minor peso alla mano e mantenere una sensazione di leggerezza nel corso dell'esplorazione.
Per le funzionalità del guanto si prevedono tre funzionalità: feedback di forza, vibrazione tattile e guida aptica.
Il feedback di forza è un sistema azionato da tendini alimentati da servomotori posti sull'avambraccio; questo sistema permette di spostare pollice e indice durante l'attivazione. Quando il sistema "sente" di essere toccato sposta le falangi regolando la chiusura delle dita per ricondurre l'utente verso un percorso.
La vibrazione tattile per la percezione di texture (come da progettazione) viene attivata da piccoli motori a vibrazione integrati nel pollice e sulla punta delle dita per fornirne le variazioni. In questo caso non si vuole riprodurre fedelmente la realtà ma si codifica, come ampiamente anticipato, con variazioni coerenti, la composizione delle superfici.
Pertanto, sempre in base al progetto, la guida tattile per la prossimità funge da guida nell'ambiente virtuale, fornendo un segnale di prossimità a seconda della distanza dall'oggetto dell'esplorazione. Grazie a schemi di avvicinamento o direzionali, l'utente può essere guidato verso l'opera come se fosse un radar per il proprio percorso.
In molti prodotti digitali, ad esperienza creata, vengono aggiunti pulsanti o modalità alternative per la fruizione inclusiva. La realtà virtuale ha una connotazione prevalentemente visiva, tutto ciò che si aggiunge sono adattamenti superficiali. Nel progetto proposto, il design inclusivo viene usato come

elemento inclusivo e non solo come rappresentazione esteriore.
Si tratta di una scelta importante che evita però problemi successivi che richiederebbero, nel prosieguo, aggiustamenti nel momento in cui la vista viene considerata il principale canale di fruizione. Quando l'inclusività è la base di partenza, anche il risultato funziona in modo diverso. Pensando per esempio all'orientamento (pur rimanendo seduti), non può essere un'opzione di assistenza opzionale ma deve essere progettato in modo direzionale e sensoriale con componenti sonori e tattici o con riconoscimento dell'azione.
Stessa cosa per il riconoscimento tattile che non possiamo considerare un sottoprodotto dell'azione ma deve essere una conditio sine qua non che aiuti a mantenere l'esplorazione e la comprensione
Anche il suono ha una sua importanza e non possiamo relegarlo alla sola funzione informativa, ma bisogna creare una gerarchia in cui l'utente può percepire il suono come interfaccia per l'orientamento, il controllo e la presenza, senza che risulti imprescindibile per l'esplorazione dell'opera d'arte.
Un museo accessibile è un museo "per tutti". Permette l'acquisizione dei contenuti con dignità, autonomia e mezzi partecipativi. In tale ottica, la collaborazione con il Museo Tattile Statale Omero di Ancona è un collegamento non solo pratico ma anche di rilevanza concettuale. In un museo in cui il coinvolgimento non visivo con l'opera è fondamentale e imprescindibile, qualsiasi utente può accedere all'esposizione nel modo più naturale possibile.
Partire da una base inclusiva significa rimodulare determinate esperienze in modo ideale per permettere di funzionare in condizioni non ideali. Le preferenze sensoriali sono varie, arriva l'affaticamento e la confidenza con la tecnologia non può esser data per scontata. Appunto per questo, non si può chiedere all'utente di adattarsi alla tecnologia ma preferibilmente proporre un'interazione che offra la possibilità di essere compresa attraverso modifiche spazio-sensoriali costantemente segnalate. La personalizzazione non rappresenta un plus ma è un mezzo per accogliere le diverse abilità sensoriali.
Il suggerimento del design inclusivo, già richiamato, parte dalla creazione di buone intenzioni, seppure bisogna confrontarsi con chi incontra gli ostacoli della disabilità visiva e con chi ricerca soluzioni di accessibilità in ambito culturale.
In ultima analisi, usare l'inclusività come base vuol dire generare un'esperienza museale in VR in cui suono e tatto emergono nel ruolo di strumento di imprescindibile accesso al coinvolgimento dell'opera che significa rendere autonomi gli utenti in un contesto che, a volte, diventa poco democratico se delega l'unico accesso alla vista. Il progetto VidMentis esplora questa traiettoria per rendere la fruibilità dell'arte in VR inclusiva, umana e completa.

Fonti: (passim)

CECCACCI S. et al., *The Role of Haptic Feedback and Gamification in Virtual Museum Systems*, 2021, Volume 14, article 38, Pag. 1 – 14.

C. LOSCOS et al., *The museum of pure form: touching real statues in an immersive virtual museum*, 2004, VAST'04: Proceedings of the 5th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, pag. 271 - 279.

05

VidMentis

5.1 Architettura generale del sistema

Il progetto VidMentis non si configura come un semplice dispositivo tecnologico, ma come un sistema integrato in cui diversi elementi concorrono alla costruzione dell'esperienza. L'interazione tra ambiente reale e ambiente virtuale, insieme all'impiego di stimoli tattili e sonori, consente di definire una modalità alternativa di accesso e fruizione dell'opera d'arte, basata sull'attivazione di canali percettivi non visivi. Il sistema è composto da componenti che operano in modo coordinato per rendere possibile un'esplorazione multisensoriale in realtà virtuale. L'utente, immerso nello spazio digitale, interagisce con l'opera attraverso il movimento naturale della mano, instaurando una relazione diretta con l'ambiente e con gli oggetti presenti, secondo una logica di continuità tra gesto fisico e risposta del sistema.

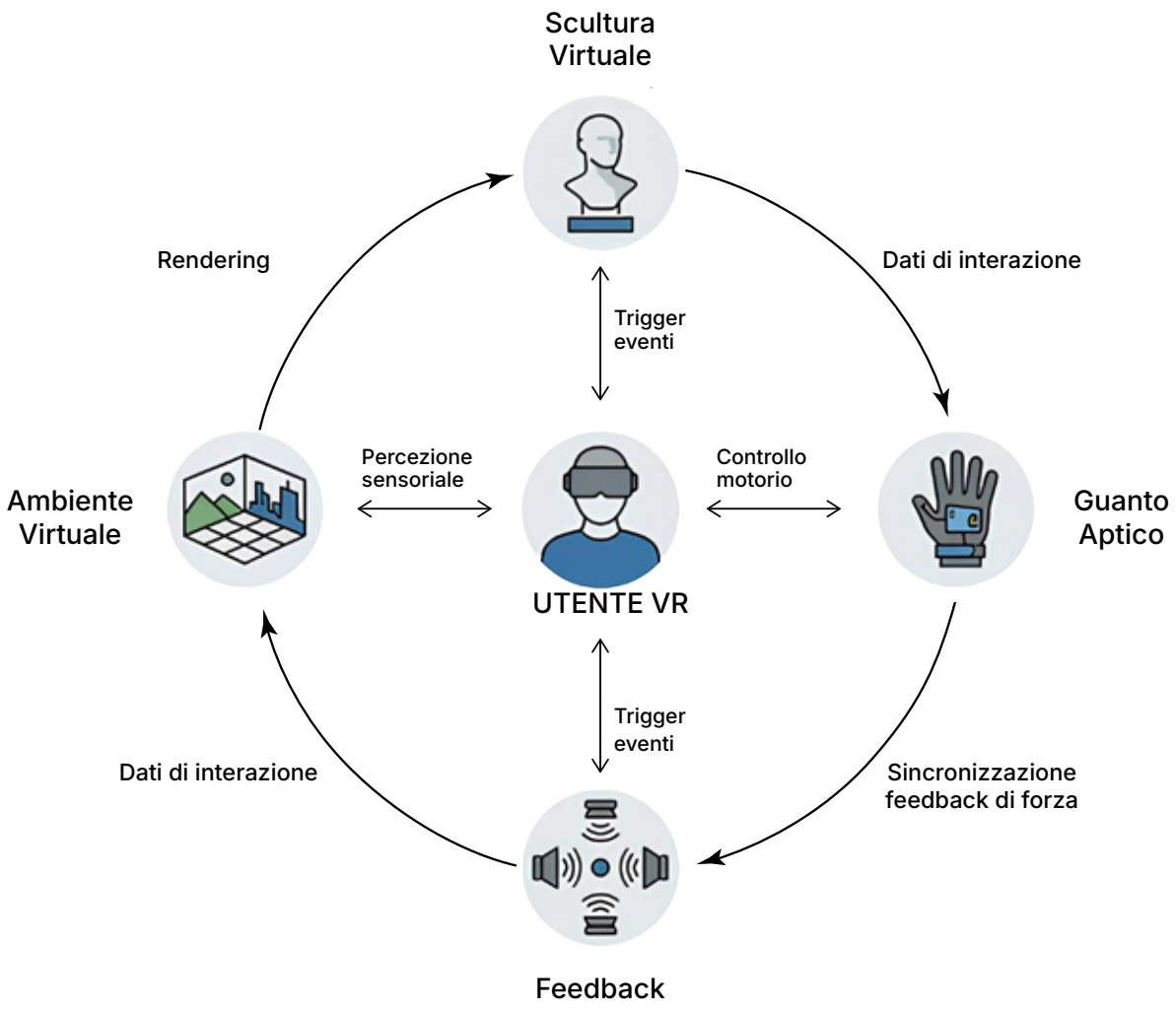


Figura 5.1 Architettura generale del sistema
Schema dell'architettura generale del sistema VidMentis. Il diagramma rappresenta l'integrazione tra utente, ambiente virtuale e interfaccia aptica, evidenziando i principali livelli funzionali e le relazioni tra i componenti che concorrono alla costruzione dell'esperienza multisensoriale.

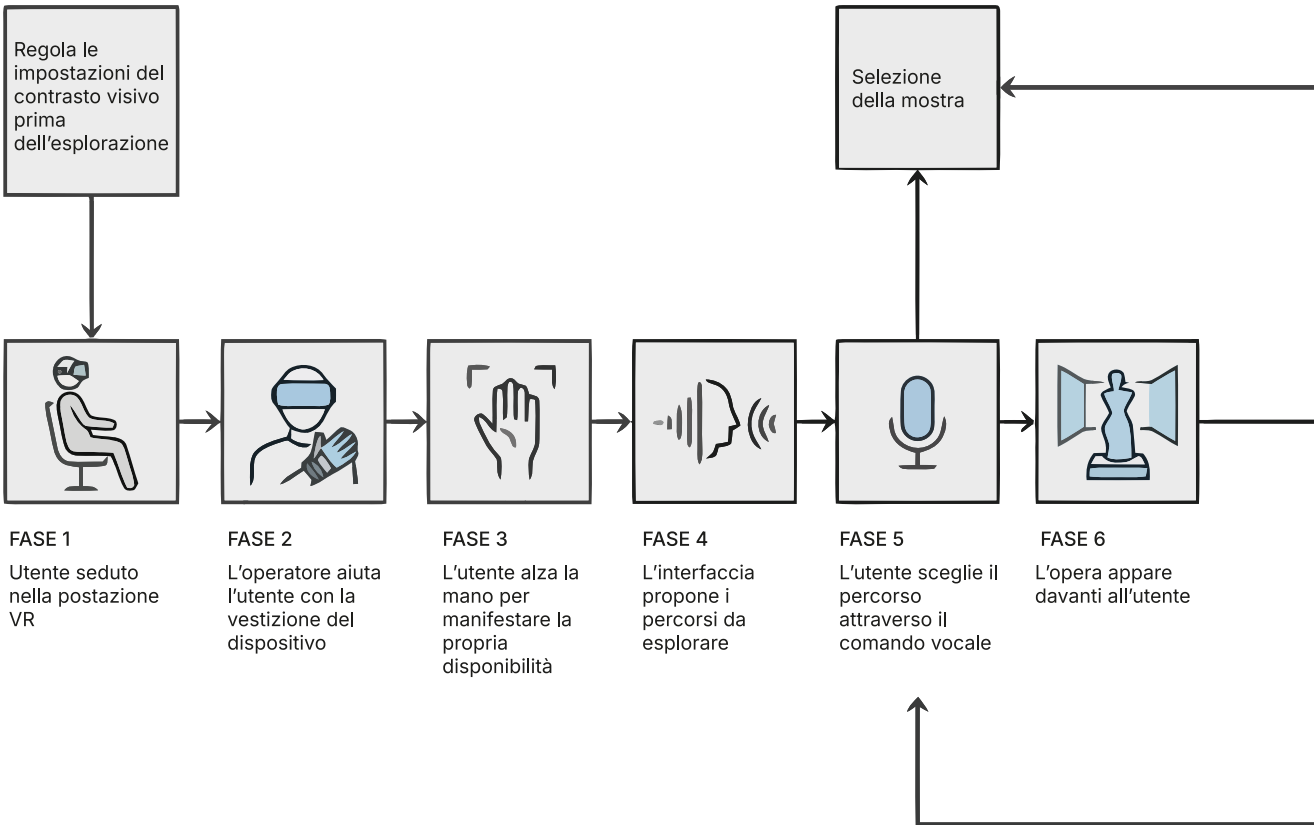
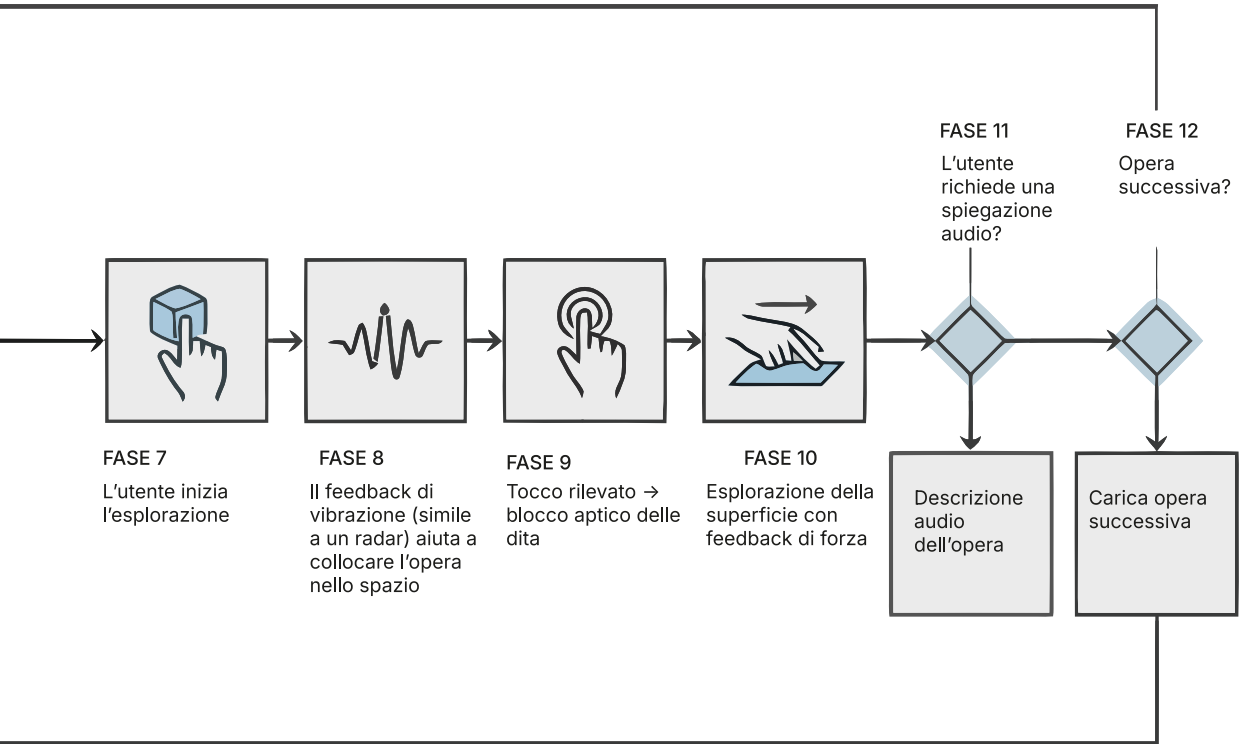


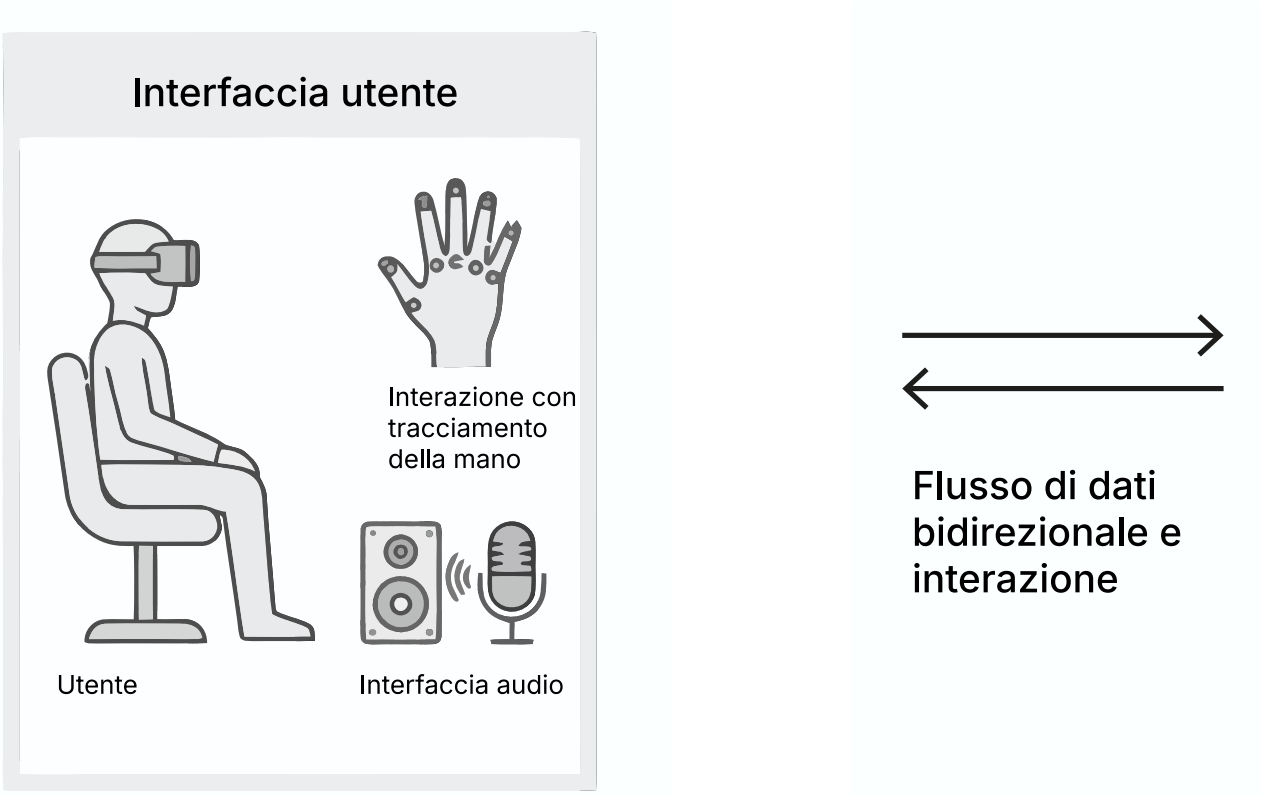
Figura 5.2 Flusso dell'interazione

Schema dell'architettura generale del sistema VidMentis. Il diagramma rappresenta l'integrazione tra utente, ambiente virtuale e interfaccia aptica, evidenziando i principali livelli funzionali e le relazioni tra i componenti che concorrono alla costruzione dell'esperienza multisensoriale.


FASE 11
L'utente richiede una spiegazione audio?
FASE 12
Opera successiva?
FASE 7
L'utente inizia l'esplorazione
FASE 8
Il feedback di vibrazione (simile a un radar) aiuta a collocare l'opera nello spazio
FASE 9
Tocco rilevato → blocco aptico delle dita
FASE 10
Esplorazione della superficie con feedback di forza
Descrizione audio dell'opera
Carica opera successiva

COMPONENTI TECNOLOGICHE

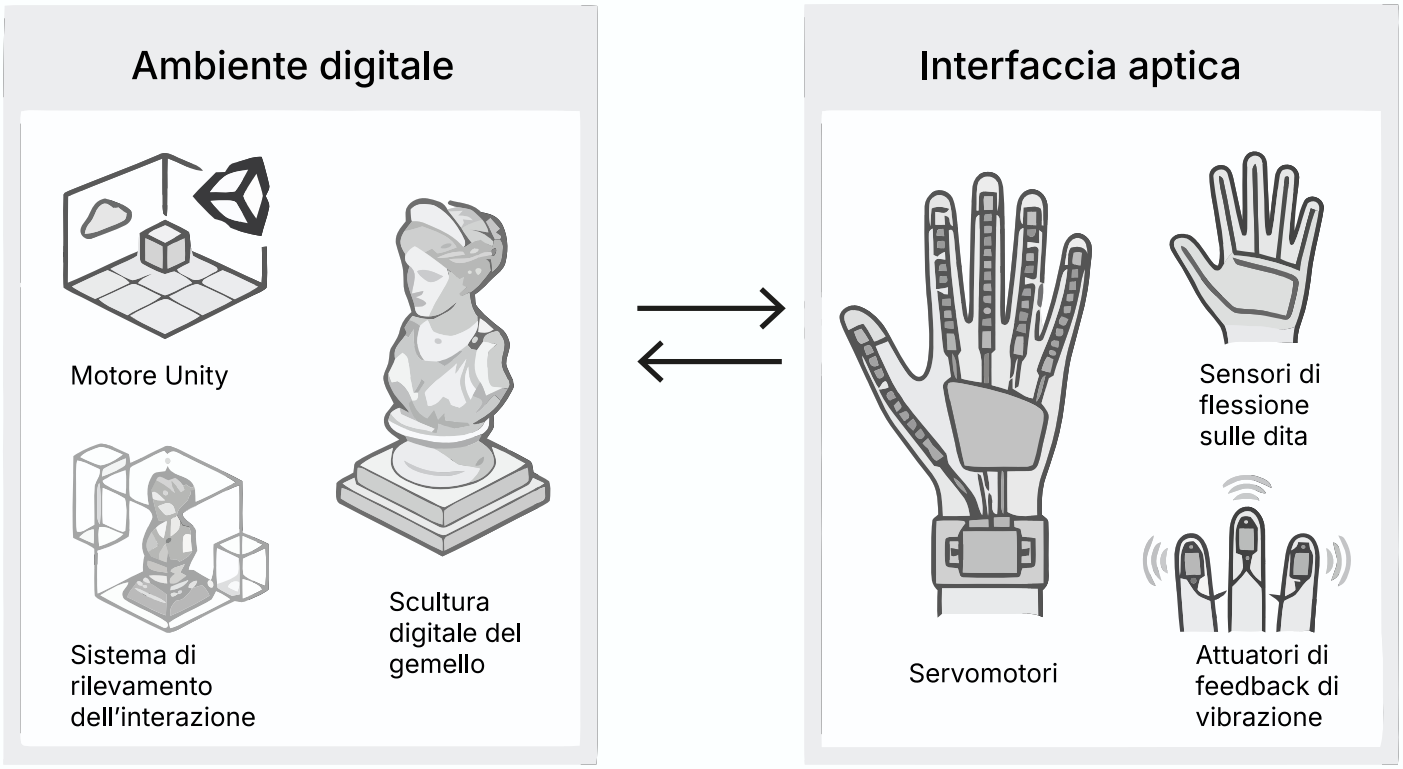
Dopo aver descritto l'architettura generale del sistema e il flusso dell'interazione tra utente e ambiente virtuale, è possibile analizzare il progetto VidMentis anche dal punto di vista delle sue componenti tecnologiche.
Il sistema può essere infatti interpretato come l'integrazione di diversi livelli funzionali che collaborano per generare l'esperienza immersiva. In particolare, le principali componenti possono essere ricondotte a tre macro-aree: l'interfaccia utente, l'ambiente digitale e l'interfaccia aptica.



INTERFACCIA UTENTE

Questo livello rappresenta il punto di accesso all'esperienza VidMentis e comprende l'utente, il visore di realtà virtuale e il sistema di tracciamento della mano. Attraverso questi elementi l'utente percepisce l'ambiente virtuale, riceve informazioni sonore e può interagire con l'opera digitale mediante il movimento naturale delle mani e l'utilizzo di comandi vocali.

Figura 5.3 Componenti del sistema



AMBIENTE DIGITALE

L'ambiente digitale costituisce lo spazio virtuale in cui si svolge l'esperienza immersiva. Sviluppato attraverso il motore di rendering Unity, questo livello gestisce il modello tridimensionale dell'opera (digital twin), le logiche di interazione e il rilevamento degli eventi di contatto tra la mano dell'utente e la superficie virtuale.

INTERFACCIA APTICA

L'interfaccia aptica rappresenta il livello di restituzione sensoriale del sistema. Il dispositivo integra sensori di flessione, attuatori vibrazionali e servomotori che controllano la trazione dei cavi lungo le dita, permettendo di simulare il contatto con la superficie dell'oggetto virtuale e restituire feedback tattili coerenti con la geometria.

5.2 Ambiente virtuale e spazio dell’esperienza

L’ambiente virtuale rappresenta il contesto spaziale all’interno del quale si sviluppa l’esperienza VidMentis. In questo progetto lo spazio non è concepito come un semplice sfondo grafico, ma come un elemento attivo del sistema, progettato per supportare l’interazione tra utente, opera digitale e dispositivi di restituzione sensoriale. La configurazione spaziale è stata definita con l’obiettivo di garantire stabilità percettiva, chiarezza nella disposizione degli elementi e facilità di orientamento, sia per utenti normodotati sia per utenti ciechi o ipovedenti.
Per ridurre il rischio di disorientamento, tipico delle esperienze immersive, l’interazione è stata progettata per essere fruita in posizione seduta. Questa scelta consente di stabilizzare il rapporto tra corpo e spazio virtuale, limitando la perdita di riferimenti e prevenendo fenomeni di discomfort o cyber sickness.
All’interno di questa configurazione, l’utente mantiene una posizione fisica stabile, mentre l’esplorazione avviene attraverso il movimento della mano e delle dita, che diventano il principale strumento di interazione. Lo spazio virtuale è organizzato in modo essenziale, evitando la presenza di elementi superflui che potrebbero distogliere l’attenzione dall’oggetto principale dell’esperienza.
L’opera digitale, rappresentata come modello tridimensionale, è posizionata frontalmente rispetto all’utente, all’interno di un’area di interazione facilmente raggiungibile con il movimento naturale del braccio. Questa disposizione consente di mantenere l’oggetto all’interno del campo d’azione della mano, riducendo la necessità di movimenti ampi o complessi.
L’ambiente è inoltre progettato per adattarsi a diverse modalità di fruizione. Nel caso di utenti ipovedenti, è possibile intervenire su alcuni parametri visivi, come il contrasto e la luminosità, al fine di migliorare la leggibilità dello spazio digitale. Questa possibilità di personalizzazione consente di rispondere alle diverse esigenze percettive mantenendo al tempo stesso coerenza e semplicità dell’interfaccia.
Nel complesso, l’ambiente virtuale di VidMentis può essere interpretato come uno spazio di mediazione tra dimensione fisica e dimensione digitale. Da un lato ospita il modello tridimensionale dell’opera e definisce le logiche di interazione; dall’altro costituisce il contesto percettivo attraverso cui l’utente costruisce l’esperienza sensoriale. La progettazione dello spazio VR assume quindi un ruolo centrale nel garantire che le diverse modalità di restituzione — tattile, sonora e visiva — operino in modo coordinato, contribuendo alla realizzazione di un’esperienza museale accessibile e multisensoriale.

Concetto di spazio di interazione aptico uditiva VidMentis

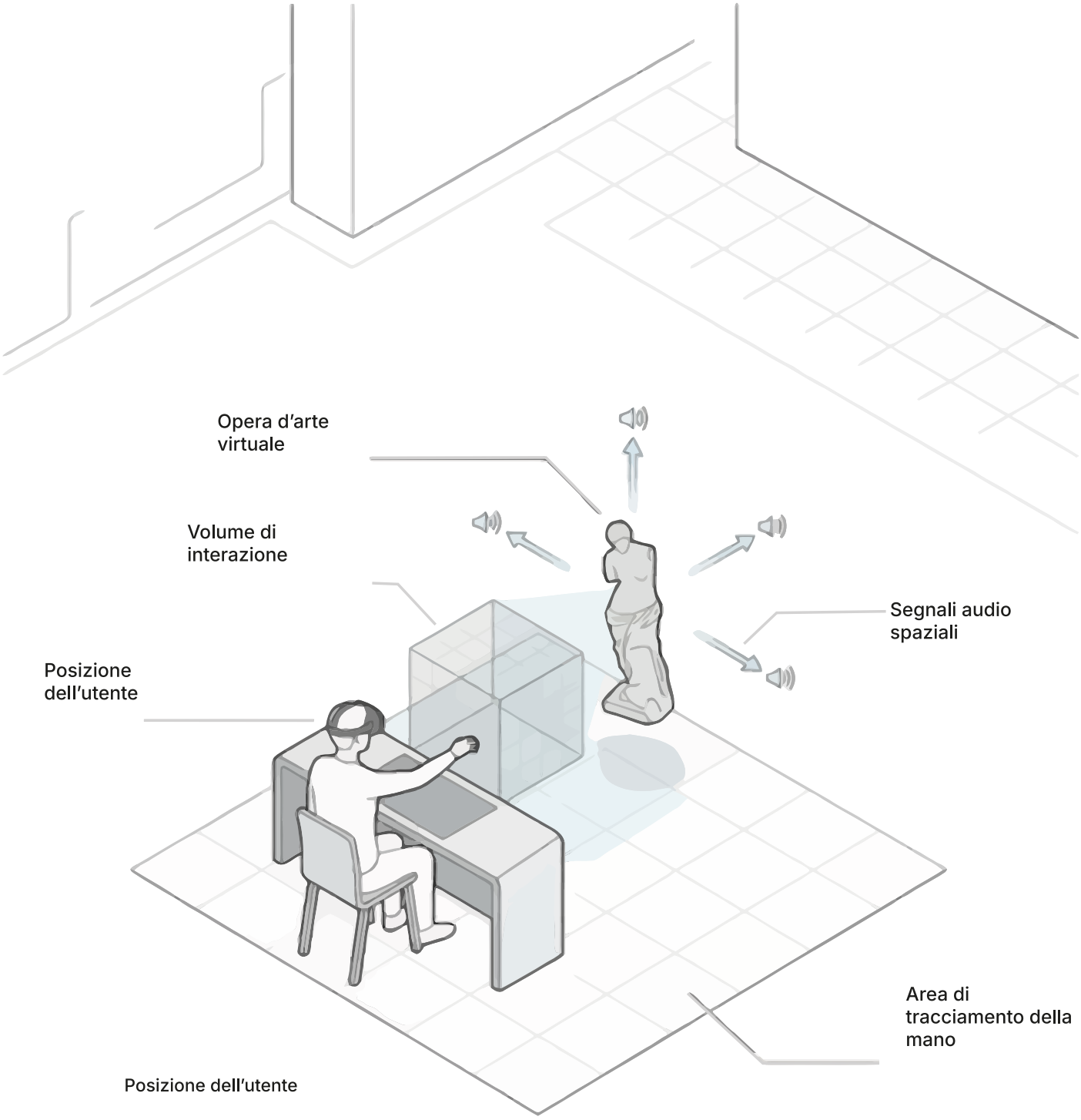


Figura 5.4 Spazio museale virtuale

5.3 Pipeline digitale dell'opera (Digital Twin)

La realizzazione dell'esperienza VidMentis richiede la trasformazione dell'opera fisica in un modello tridimensionale digitale, esplorabile all'interno dello spazio virtuale. Questo processo, comunemente definito digital twin, consente di ottenere una rappresentazione digitale dell'opera che ne preserva le caratteristiche geometriche e le qualità percettive necessarie per l'interazione in realtà virtuale.
La pipeline digitale del progetto si articola in una sequenza di fasi che permettono di passare dall'oggetto reale a un asset ottimizzato per l'utilizzo in tempo reale.
Il primo passaggio consiste nell'acquisizione tridimensionale dell'opera attraverso tecniche di scansione ad alta risoluzione, che permettono di rilevare con precisione la geometria e, ove necessario, informazioni relative alla superficie. Il risultato di questa fase è un modello digitale grezzo, che rappresenta il punto di partenza per le elaborazioni successive.
Successivamente, il modello viene sottoposto a una fase di ottimizzazione, finalizzata a ridurre la complessità della mesh mantenendo la fedeltà formale dell'opera. Questo processo consente di bilanciare il livello di dettaglio con le esigenze di performance, riducendo il numero di poligoni e il carico computazionale richiesto per la visualizzazione e l'interazione in tempo reale.
Una volta ottimizzato, il modello viene importato all'interno del motore grafico, in questo caso Unity, dove viene configurato come oggetto interattivo. In questa fase vengono definite le proprietà necessarie per l'interazione, incluse le logiche di comportamento e i sistemi di rilevamento del contatto tra la mano dell'utente e la superficie digitale.
L'ultima fase della pipeline riguarda l'associazione del modello a specifiche logiche di restituzione sensoriale. La geometria dell'opera non viene quindi utilizzata esclusivamente per la rappresentazione visiva, ma diventa una base informativa per la generazione di stimoli coerenti con l'interazione, contribuendo alla costruzione dell'esperienza percettiva.
Nel corso dello sviluppo del progetto è inoltre prevista l'integrazione di sistemi basati su intelligenza artificiale, con l'obiettivo di arricchire le modalità di interazione e supportare una maggiore interpretazione dei contenuti digitali.

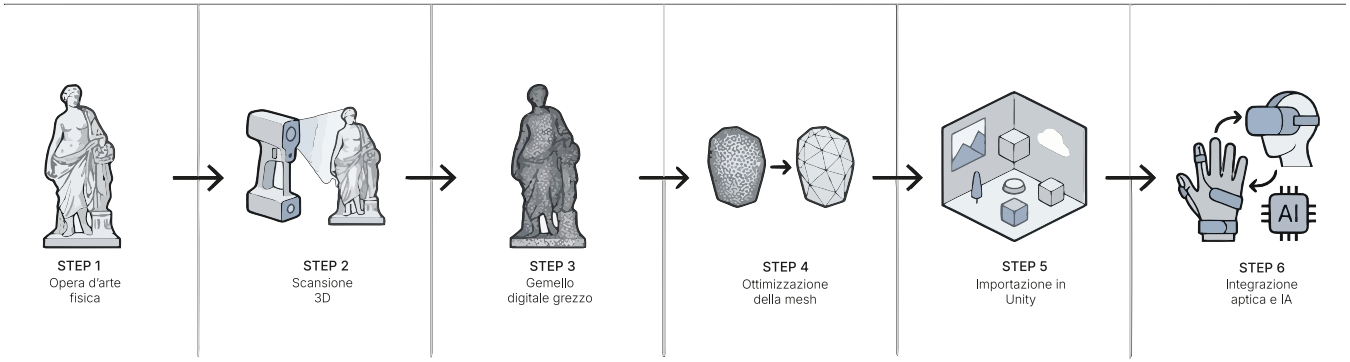


Figura 5.5 Pipeline digitale dell'opera

5.4 Sistema di interazione utente-opera

Il sistema di interazione sviluppato in VidMentis si basa sul principio di un'interazione naturale tra utente e opera digitale. A differenza di molte esperienze immersive che richiedono l'utilizzo di controller fisici o interfacce di input intermedie, il progetto privilegia un approccio gestuale diretto, privo di strumenti di controllo aggiuntivi. L'utente interagisce con l'opera replicando un comportamento esplorativo analogo a quello che adotterebbe di fronte a un oggetto reale, instaurando una relazione immediata con la forma e lo spazio.
Questa scelta progettuale risponde a una duplice esigenza. Da un lato consente di ridurre la complessità dell'interfaccia, rendendo l'esperienza più accessibile e intuitiva; dall'altro permette di mantenere una continuità percettiva tra movimento fisico e risposta del sistema, elemento fondamentale per costruire un'interazione coerente.
Il movimento della mano viene rilevato attraverso le funzionalità di tracciamento integrate nel visore, che consentono di monitorare in tempo reale la posizione tridimensionale nello spazio. Queste informazioni vengono tradotte in coordinate all'interno dell'ambiente virtuale, permettendo la generazione di una rappresentazione digitale della mano con cui l'utente può interagire direttamente.
L'interazione si sviluppa attraverso un confronto continuo tra la posizione della mano e la geometria del modello tridimensionale. Quando la mano si avvicina alla superficie dell'oggetto fino a superare una soglia di prossimità predefinita, il sistema interpreta tale condizione come un evento di contatto.

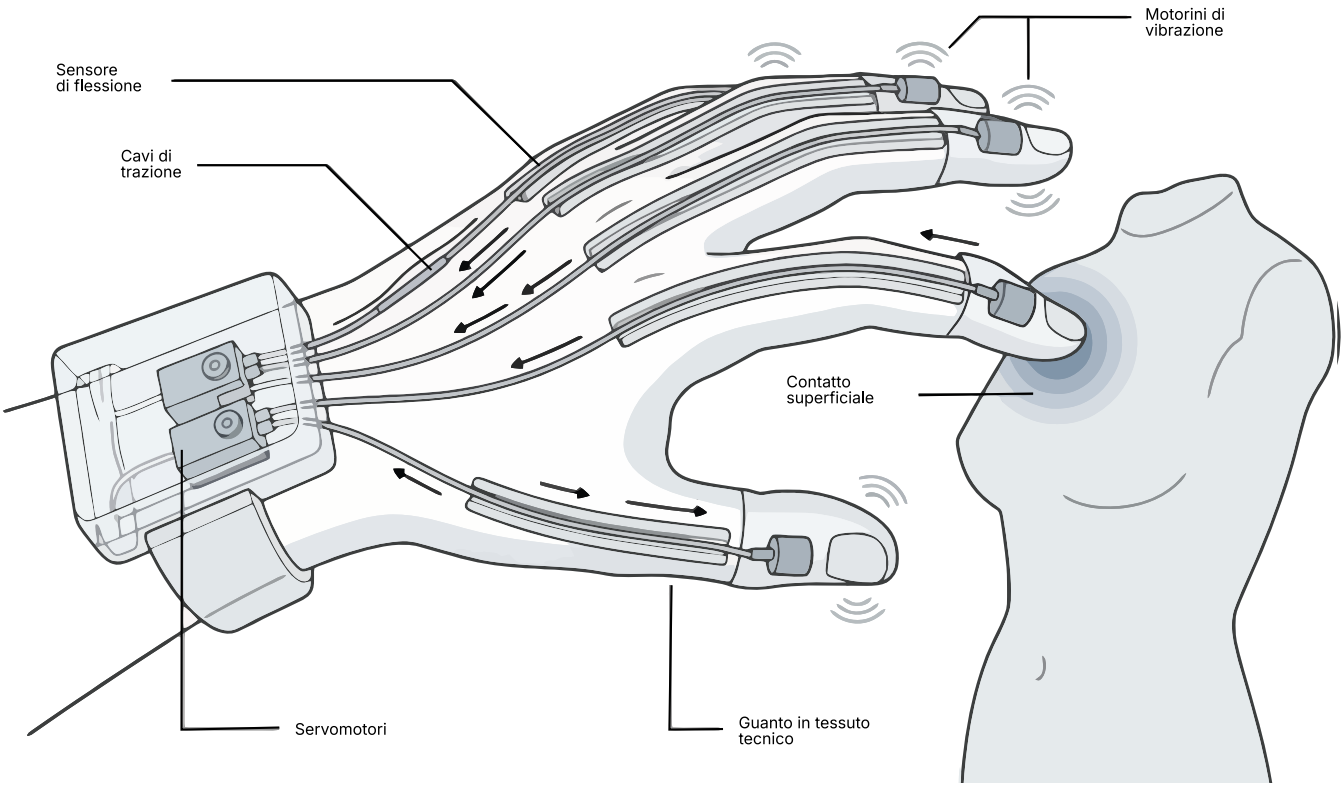


Figura 5.6 Interazione utente-opera

Questo processo si basa su un meccanismo noto come collision detection, utilizzato nell'ambito della grafica interattiva per identificare l'intersezione tra oggetti nello spazio virtuale. Nel caso di VidMentis, il sistema verifica la relazione tra la mano virtuale e la mesh tridimensionale che descrive la superficie dell'opera, generando un evento quando viene rilevata una condizione di contatto.
Il contatto rappresenta un passaggio fondamentale nella sequenza di interazione, poiché segna il momento in cui l'informazione digitale viene trasformata in esperienza percettiva. A partire da questo evento, il sistema attiva una risposta sensoriale coerente con l'interazione in atto, permettendo all'utente di percepire la presenza e la forma dell'oggetto.
Il movimento della mano non si limita quindi a generare un input, ma diventa parte integrante di un processo continuo di azione e risposta. In questo modo si stabilisce una relazione diretta tra gesto e percezione, che consente di costruire un'esperienza in cui l'interazione si sviluppa attraverso il corpo, secondo uno dei principi cardine del progetto VidMentis.

5.5 Sistema di feedback multisensoriale

Questa sezione descrive il sistema di feedback multisensoriale che completa l'esperienza VidMentis e consente di percepire l'opera d'arte attraverso canali alternativi alla vista. Il progetto integra tre modalità percettive principali: feedback di forza, vibrazione tattile e audio spaziale. Queste tre modalità percettive operano in modo coordinato per restituire informazioni sulla forma, sulla posizione e sulle caratteristiche della superficie dell'oggetto virtuale.
L'obiettivo è permettere all'utente di costruire una rappresentazione mentale coerente dell'opera attraverso una combinazione di stimoli tattili e sonori. A differenza delle esperienze VR tradizionali, prevalentemente basate sul canale visivo, VidMentis utilizza la multisensorialità per trasferire informazioni spaziali e materiche direttamente al corpo, trasformando l'esplorazione dell'opera in un processo percettivo attivo.
In questo contesto, il sistema non si limita a produrre singoli segnali sensoriali, ma costruisce una vera e propria architettura percettiva, in cui i diversi canali operano in sinergia.
Il feedback di forza consente di percepire la presenza e la consistenza dell'oggetto digitale, restituendo una sensazione di resistenza al contatto. La vibrazione tattile integra questa informazione fornendo indicazioni più sottili relative alle variazioni della superficie, alle discontinuità geometriche e ai dettagli formali dell'opera.
Parallelamente, l'audio spaziale contribuisce alla costruzione dell'ambiente percettivo, supportando l'orientamento dell'utente e facilitando la localizzazione dell'opera nello spazio virtuale.
L'integrazione tra queste modalità sensoriali permette di strutturare un'esperienza in cui le informazioni non sono trasmesse in modo isolato, ma emergono dalla loro combinazione.
La percezione dell'opera si sviluppa quindi come un processo progressivo, in cui l'utente costruisce una mappa mentale tridimensionale attraverso l'esplorazione e l'interpretazione degli stimoli

ricevuti. L'esperienza museale non è più mediata esclusivamente dalla vista, ma si configura come una relazione dinamica tra gesto, percezione e spazio digitale.
Il sistema di feedback multisensoriale rappresenta, in questo senso, uno degli elementi centrali dell'ecosistema VidMentis. L'integrazione tra componente aptica e dimensione sonora costituisce il presupposto per un'esperienza museale inclusiva, capace di rendere accessibile l'esplorazione delle opere anche a utenti non vedenti o ipovedenti.

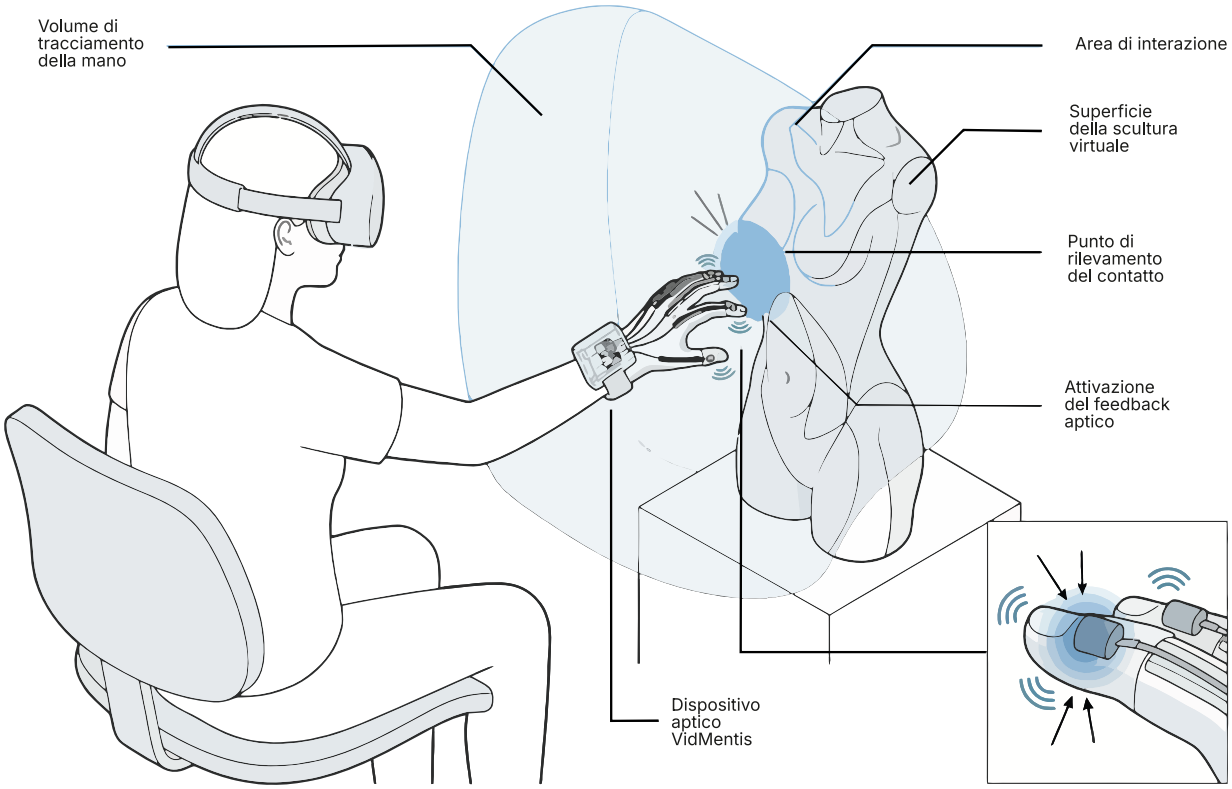


Figura 5.7 Feedback multisensoriale

06

Progettazione del dispositivo aptico

6.1 Requisiti progettuali e criteri di design

La progettazione del dispositivo aptico VidMentis si configura come un passaggio dalla definizione dell'esperienza virtuale alla realizzazione di un'interfaccia fisica capace di tradurre eventi digitali in stimoli corporei. In questo contesto, il dispositivo non è concepito come un semplice accessorio tecnologico, ma come un elemento strutturale del sistema, responsabile della mediazione tra ambiente virtuale e percezione dell'utente.

Il progetto si fonda su un primo principio di natura interattiva: l'adozione del gesto naturale della mano come modalità primaria di esplorazione. A differenza di molte interfacce VR che richiedono l'utilizzo di controller esterni, il dispositivo è stato progettato per integrarsi direttamente con il movimento delle dita, riducendo la distanza tra azione e risposta del sistema. Questo approccio consente di mantenere una continuità tra comportamento motorio reale e interazione digitale, evitando l'introduzione di mediazioni artificiali.

Un secondo principio riguarda la distribuzione delle funzioni tra le diverse componenti del dispositivo. La progettazione ha seguito una logica di separazione tra elementi indossabili e componenti più ingombranti, con l'obiettivo di ridurre il peso percepito sulla mano e migliorare il comfort durante l'utilizzo. Questa scelta ha portato a una configurazione in cui i sistemi di attuazione e controllo sono organizzati in moduli distinti ma interconnessi.

Un ulteriore aspetto progettuale riguarda la modularità del sistema.

Il dispositivo è stato concepito come un insieme di elementi sostituibili e modificabili, in modo da consentire eventuali aggiornamenti o adattamenti senza dover intervenire sull'intera struttura. Questo approccio risponde sia a esigenze di sviluppo prototipale sia alla possibilità di evoluzione futura del sistema.

Infine, la progettazione ha considerato in modo centrale il rapporto tra precisione del feedback e sostenibilità ergonomica. La generazione di stimoli aptici richiede componenti in grado di esercitare forze controllate sulle dita, ma tali componenti devono essere integrati in una struttura leggera e indossabile. Il dispositivo rappresenta quindi un equilibrio tra capacità di restituzione fisica e vincoli legati all'uso prolungato.

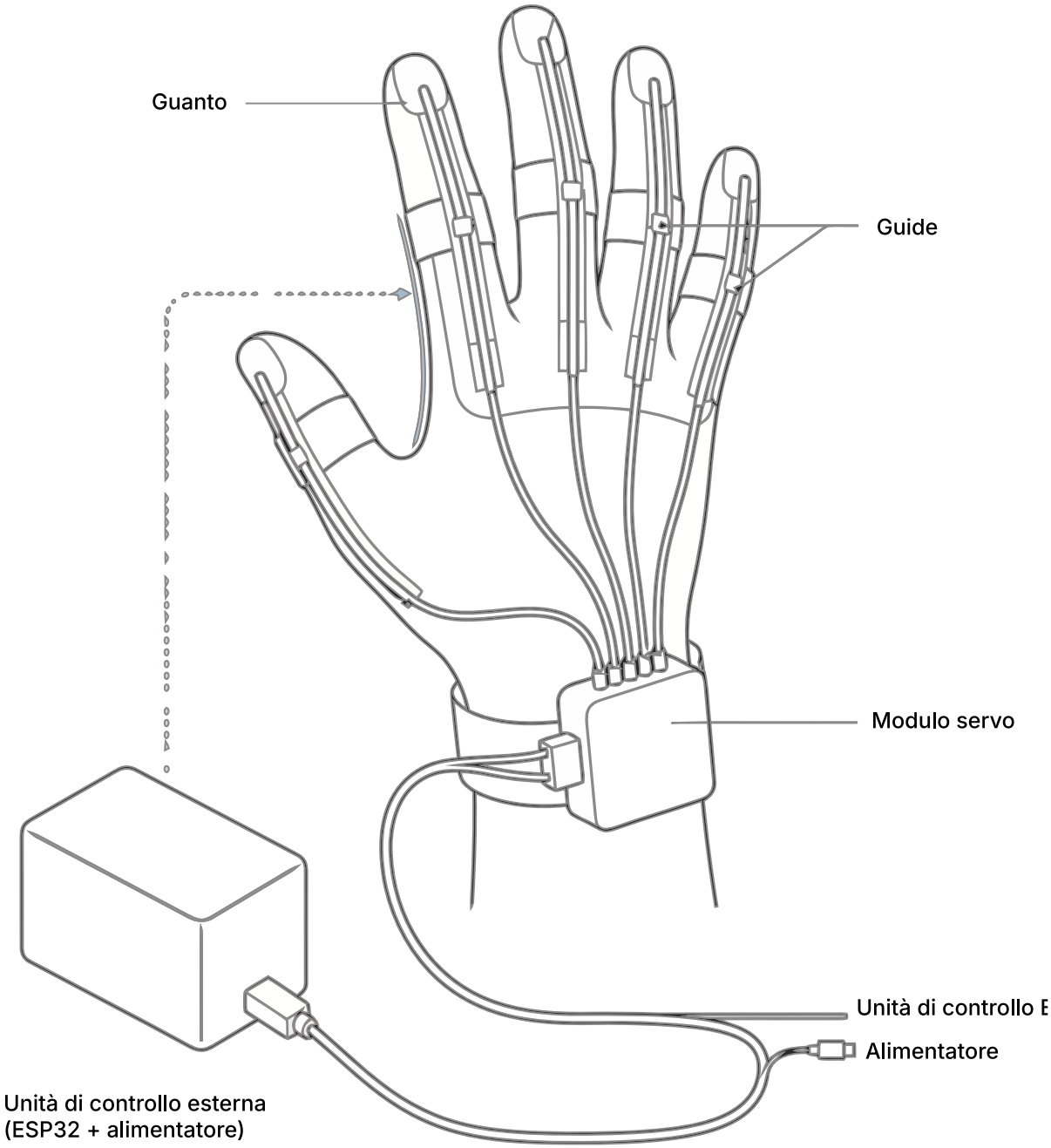


Figura 6.1 Schema generale del dispositivo

6.2 Architettura hardware e componenti del sistema

L'architettura hardware di VidMentis è organizzata secondo una configurazione distribuita, che separa le funzioni di rilevazione, attuazione e controllo in componenti fisicamente distinti ma coordinati.
Il sistema si articola in tre elementi principali: il guanto indossabile, il modulo di attuazione posizionato sul polso e un'unità di controllo esterna contenente microcontrollore e alimentazione.
Il guanto rappresenta l'interfaccia diretta con la mano dell'utente ed è realizzato in tessuto tecnico, scelto per garantire flessibilità, adattabilità e comfort. Su ciascun dito sono integrate guide in materiale plastico che seguono l'andamento delle falangi. Queste guide svolgono una doppia funzione: da un lato ospitano i sensori di flessione, utilizzati per rilevare il grado di piegatura delle dita; dall'altro costituiscono il supporto per lo scorrimento dei cavi che trasmettono la forza generata dai servomotori.
All'interno del sistema sono presenti sensori di flessione (flex sensor) che consentono di acquisire in tempo reale la configurazione delle dita. Questi dati rappresentano l'input principale per la ricostruzione della mano virtuale all'interno dell'ambiente digitale.
Il feedback di forza è generato attraverso un sistema di trasmissione tendon-driven. I cavi scorrono lungo le guide e sono collegati ai servomotori alloggiati in un modulo posizionato sul polso. Questa configurazione consente di mantenere le dita leggere e libere, delegando la generazione della forza a una zona più stabile del corpo.
In corrispondenza delle estremità delle dita sono integrati attuatori vibrazionali, progettati per fornire stimoli localizzati. La loro posizione consente di intervenire direttamente nei punti di contatto con la superficie virtuale, aumentando la precisione della percezione.

Figura 6.2 Rendering del dispositivo aptico VidMentis

Il controllo del sistema è affidato a un microcontrollore ESP32, collocato in un'unità separata nelle vicinanze dell'utente. Questa scelta consente di ridurre ulteriormente il peso del dispositivo indossato e di gestire in modo più efficiente l'alimentazione. Il collegamento tra unità di controllo e guanto avviene tramite cavo, garantendo stabilità nella trasmissione dei dati e dell'energia.
Nel suo insieme, l'architettura hardware è progettata per garantire una distribuzione equilibrata delle masse, una buona libertà di movimento e la possibilità di intervenire su singoli componenti senza compromettere il funzionamento complessivo.

6.3 Integrazione software-hardware e comunicazione con Unity

Il funzionamento del sistema VidMentis si basa sull'integrazione tra ambiente virtuale e dispositivo fisico, resa possibile da un flusso continuo di dati tra software e hardware.
All'interno dell'ambiente VR, il tracciamento della mano è gestito dal sistema di hand tracking del visore, che consente di rilevare in tempo reale posizione e configurazione delle dita. Queste informazioni vengono utilizzate per aggiornare la rappresentazione della mano virtuale nello spazio digitale.
L'interazione con l'oggetto avviene attraverso un sistema di collision detection implementato nel motore grafico Unity. Quando la distanza tra la mano virtuale e la superficie dell'oggetto scende al di sotto di una soglia definita, il sistema interpreta l'evento come contatto. Questo evento non ha solo un significato grafico, ma rappresenta il punto di attivazione della risposta aptica.
A seguito della rilevazione del contatto, Unity genera un segnale che viene trasmesso al microcontrollore. La comunicazione avviene tramite un protocollo seriale, che consente di inviare istruzioni relative all'intensità e al tipo di feedback da attivare.
Il microcontrollore ESP32 riceve il segnale e lo traduce in comandi per gli attuatori. In base ai dati ricevuti, il sistema attiva i servomotori per generare la tensione nei cavi e i motori vibrazionali per produrre stimoli localizzati.
Questo processo avviene in tempi ridotti, in modo da garantire una risposta coerente con l'azione dell'utente. La sincronizzazione tra evento digitale e risposta fisica rappresenta un elemento fondamentale per la credibilità dell'interazione.
L'integrazione tra software e hardware non è quindi un semplice collegamento funzionale, ma costituisce una catena di trasformazione che parte da un evento virtuale e si conclude in una stimolazione fisica percepibile.

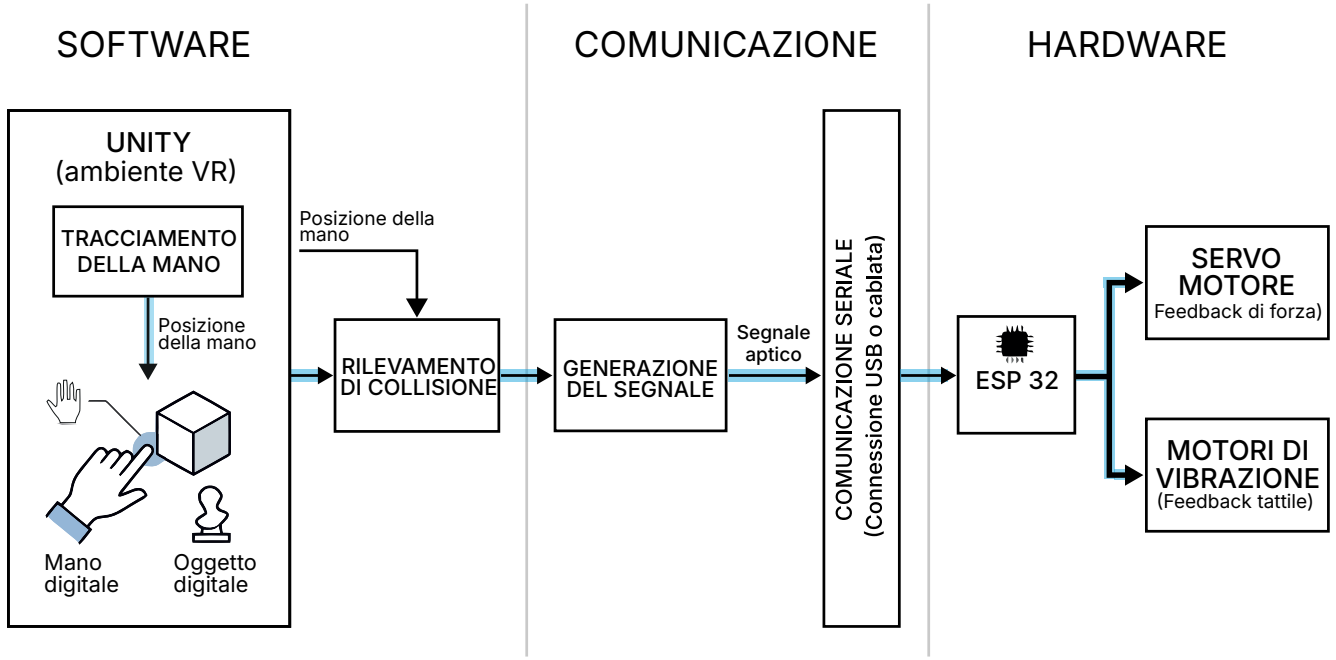
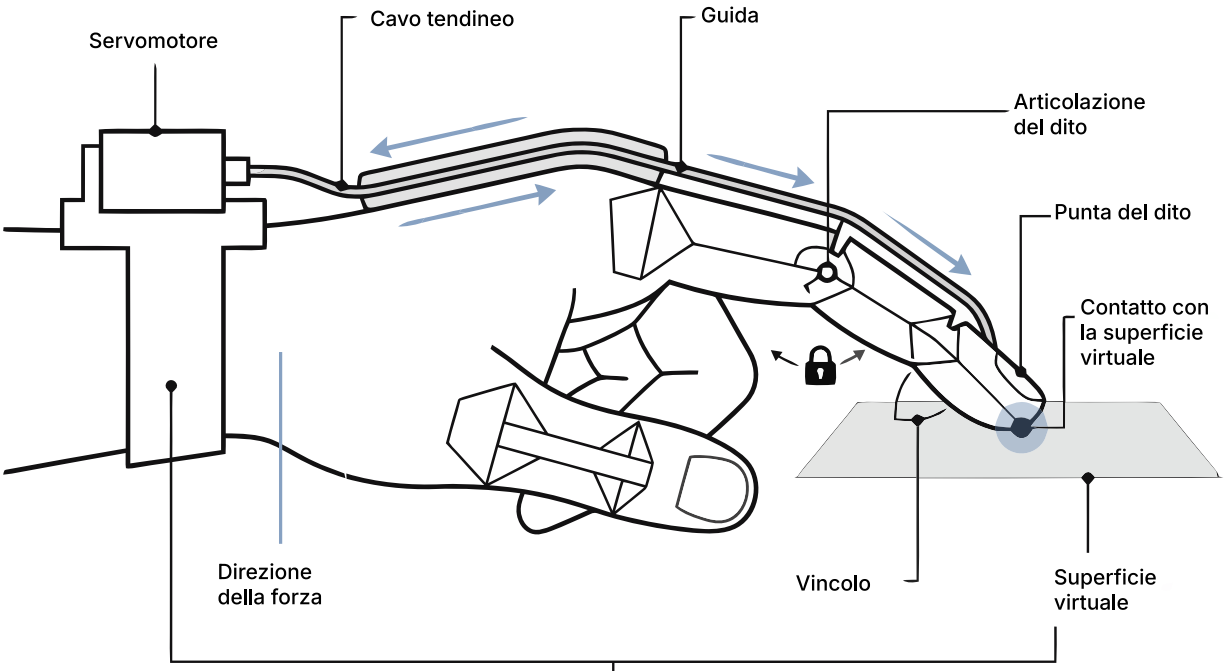


Figura 6.3 Flusso Unity → ESP32 → attuatori

6.4 Sistema aptico e modalità di interazione

Il sistema aptico rappresenta il livello in cui il dispositivo esercita un'azione diretta sul corpo dell'utente, traducendo i segnali provenienti dall'ambiente virtuale in stimoli fisici localizzati.
Il funzionamento si basa sull'integrazione di due modalità principali di restituzione: la generazione di una resistenza al movimento delle dita e la produzione di vibrazioni localizzate. Queste due componenti non operano in modo indipendente, ma vengono attivate in modo coordinato per costruire una risposta coerente con le caratteristiche dell'oggetto virtuale.
Il feedback di forza è ottenuto attraverso un sistema tendon-driven, in cui i cavi collegati ai servomotori esercitano una trazione sulle dita. Quando viene rilevato un contatto con la superficie digitale, il sistema attiva i motori e applica una tensione controllata, limitando il movimento delle dita. Questo effetto produce una sensazione di vincolo che simula la presenza di una superficie fisica.
La modulazione della tensione consente di variare l'intensità della resistenza, permettendo di differenziare tra superfici più rigide o più cedevoli. In questo modo, il sistema non si limita a segnalare il contatto, ma contribuisce a definire le caratteristiche percettive dell'oggetto.
Il sistema vibrazionale interviene in modo complementare. Gli attuatori posizionati sulle dita vengono utilizzati sia per fornire indicazioni preliminari sulla presenza dell'oggetto nello spazio, sia per arricchire la percezione durante l'esplorazione della superficie. Le variazioni di frequenza e intensità delle vibrazioni consentono di suggerire differenze di texture o discontinuità geometriche.
L'interazione avviene attraverso il movimento diretto della mano, senza interfacce intermedie. Il dispositivo non introduce nuovi gesti, ma si inserisce all'interno di un comportamento motorio già consolidato, sfruttando la capacità della mano di esplorare e riconoscere forme attraverso il contatto.
La percezione dell'oggetto emerge quindi da un processo progressivo, in cui l'utente integra nel tempo informazioni provenienti da diversi stimoli. Il sistema aptico non restituisce una rappresentazione completa in modo immediato, ma supporta un'esplorazione attiva, in cui la conoscenza dell'oggetto si costruisce attraverso l'interazione.
Nel suo insieme, il dispositivo consente di trasformare un evento digitale in un'esperienza fisica localizzata, in cui il corpo diventa il principale canale di accesso alle informazioni.



Servomotore
(modulo del polso)

↓

Cavo tendineo:
trasmette la forza

↓

Guida lungo il dito:
instrada il cavo

↓

Limitazione del movimento del
dito: vincolo attivo

↓

Contatto con la superficie virtuale:
punto di feedback aptico

Figura 6.4 Meccanismo tendon-driven

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha esplorato il rapporto tra realtà virtuale, accessibilità e progettazione inclusiva, con particolare attenzione alle esigenze delle persone non vedenti e ipovedenti nella fruizione dell'arte.
Il punto di partenza della ricerca è stato il riconoscimento di una criticità diffusa nelle esperienze immersive contemporanee: nonostante il rapido sviluppo delle tecnologie di realtà virtuale, la maggior parte delle applicazioni culturali e museali continua a essere fortemente centrata sulla dimensione visiva, limitando di fatto la partecipazione autonoma di utenti con disabilità visiva.
L'analisi del contesto teorico e normativo ha evidenziato come, negli ultimi anni, il tema dell'accessibilità digitale sia diventato centrale nelle politiche europee e nelle linee guida internazionali. Tuttavia, l'applicazione concreta di tali principi nelle esperienze immersive rimane ancora frammentaria. La realtà virtuale, spesso presentata come tecnologia capace di ampliare le modalità di fruizione culturale, rischia infatti di riprodurre le stesse barriere presenti nei contesti fisici quando la progettazione non considera fin dall'inizio la diversità percettiva degli utenti.
A partire da questa consapevolezza, la ricerca ha analizzato lo stato dell'arte delle esperienze di realtà virtuale accessibili a persone non vedenti e ipovedenti. Dallo studio della letteratura scientifica e dei progetti esistenti è emerso che l'accessibilità nelle esperienze immersive non può essere ottenuta attraverso una semplice "traduzione" delle informazioni visive in altre modalità sensoriali. Al contrario, è necessario ripensare l'intero sistema di interazione, costruendo ambienti progettati sin dall'origine per essere fruiti attraverso più canali percettivi.
Un elemento ricorrente nelle esperienze analizzate riguarda il ruolo fondamentale del tatto come strumento di conoscenza spaziale e formale. Per le persone non vedenti, il tatto rappresenta infatti uno dei principali mezzi attraverso cui comprendere la forma, il volume e la struttura degli oggetti. In questo senso, l'integrazione di tecnologie aptiche nella realtà virtuale si configura come una direzione di ricerca particolarmente promettente, poiché consente di restituire una dimensione corporea e materiale all'interazione con gli oggetti virtuali.
Parallelamente, l'analisi dei casi studio ha evidenziato anche alcune criticità ricorrenti. Molte esperienze risultano infatti eccessivamente complesse dal punto di vista dell'interazione oppure basate su metafore visive che non trovano un equivalente efficace nella dimensione tattile o sonora. Un altro limite riguarda la scarsa chiarezza dei feedback durante l'interazione: nelle esperienze progettate principalmente per utenti vedenti, numerose conferme di azione sono affidate a segnali visivi che risultano assenti o poco leggibili per chi utilizza altri sensi.
Alla luce di queste considerazioni, il progetto sviluppato in questa tesi propone un approccio progettuale basato sulla multisensorialità e sulla centralità dell'esperienza corporea. Il dispositivo aptico VidMentis nasce con l'obiettivo di consentire l'esplorazione di opere d'arte all'interno di ambienti virtuali attraverso il tatto simulato, integrando feedback aptici, vibrotattili e sonori per guidare l'utente nell'interazione.
Il progetto non si limita alla realizzazione di un dispositivo tecnologico, ma propone una riflessione più ampia sul ruolo della progettazione inclusiva nelle esperienze digitali. In questo senso, la realtà virtuale viene interpretata non come semplice strumento di visualizzazione, ma come ambiente esperienziale

in cui diverse modalità sensoriali possono essere integrate per costruire nuove forme di accesso alla conoscenza.
Uno degli aspetti centrali emersi durante il processo progettuale riguarda l'importanza della chiarezza dell'azione. In un'esperienza accessibile, ogni interazione deve essere accompagnata da feedback immediati e comprensibili che permettano all'utente di comprendere cosa sta accadendo e quale effetto produce il proprio gesto. L'integrazione di segnali aptici e audio spaziale consente di rafforzare questa dimensione comunicativa, trasformando l'interazione in un dialogo continuo tra utente e ambiente virtuale.
Un ulteriore elemento rilevante riguarda il valore culturale di questo tipo di approccio. L'accessibilità non rappresenta infatti soltanto un requisito tecnico, ma può diventare un'opportunità progettuale capace di arricchire l'esperienza per tutti gli utenti. Progettare ambienti pensati anche per persone non vedenti porta infatti a privilegiare forme di interazione più chiare, più corporee e più immersive, migliorando la qualità complessiva dell'esperienza.
Il progetto VidMentis si inserisce quindi in una prospettiva di ricerca che vede nella realtà virtuale uno strumento capace di ampliare le possibilità di accesso al patrimonio culturale. L'integrazione di dispositivi aptici indossabili e ambienti virtuali multisensoriali apre scenari interessanti non solo per il contesto museale, ma anche per ambiti educativi, riabilitativi e formativi.
Naturalmente, il lavoro presentato rappresenta un primo passo all'interno di un campo di ricerca ancora in evoluzione. Futuri sviluppi potrebbero riguardare il perfezionamento del dispositivo aptico, l'ampliamento delle modalità di feedback sensoriale e la sperimentazione con un numero più ampio di utenti. In particolare, la collaborazione con istituzioni culturali e musei tattili potrebbe permettere di testare il sistema in contesti reali, raccogliendo dati utili per migliorare ulteriormente l'esperienza.
Un'altra direzione di sviluppo riguarda l'integrazione con sistemi di intelligenza artificiale e di personalizzazione dell'esperienza, che potrebbero adattare dinamicamente i feedback sensoriali alle preferenze e alle capacità percettive dei singoli utenti.
In conclusione, questa tesi evidenzia come la progettazione inclusiva possa rappresentare un terreno fertile per l'innovazione nel campo della realtà virtuale. Ripensare l'esperienza immersiva a partire dai bisogni delle persone con disabilità visiva non significa semplicemente eliminare barriere, ma aprire nuove possibilità di relazione tra tecnologia, corpo e conoscenza. In questo scenario, il tatto torna a occupare un ruolo centrale, non come sostituto della vista, ma come modalità autonoma e ricca di significato per esplorare e comprendere il mondo, reale o virtuale che sia.

Bibliografia

AGAMBEN G., Alla foce, Torino 2025.

CACCIARI M., Generare Dio, Bologna 2017.

CECCACCI S. et al., *The Role of Haptic Feedback and Gamification in Virtual Museum Systems*, 2021, Volume 1 4, article 38, Pag. 1 – 14, trad. a cura della laureanda.
https://dl.acm.org/doi/10.1145/3453074

COLWELL C. et al., *Haptic virtual reality for blind computer users*, 1998, Proceedings of the third international ACM conference on Assistive technologies, https://doi.org/10.1145/274497.274515, trad. a cura della laureanda.

CURI U., La morte del tempo, Bologna 2021.

ESPINOSA-CASTANEDA R. et al., *Virtual haptic perception as an educational assistive technology: a case study in inclusive education*, volume 14, 2021, https://ieeexplore.ieee.org/document/9115280, trad. a cura della laureanda.

GUERREIRO J. et al., *The design space of the auditory representation of objects and their behav-iours in virtual reality for blind people*, volume 29, 2023, https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=2945, trad. a cura della laureanda.

HARDWICK A. et al., *Tactile display of virtual reality from the World Wide Web - a potential ac-cess method for blind people*, 1998, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014193829800016X, trad. a cura della laureanda.

HEAP T. et al., *Experiencing Virtual Reality for Perspective-Taking of Blind and Visually Impaired Learners*, 2023, https://www.researchgate.net/publication/375306609_Experiencing_Virtual_Reality_for_Perspective-Taking_of_Blind_and_Visually_Impaired_Learners, trad. a cura della laureanda.

HERRERA F. et al., *Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and vir-tual reality perspective-taking*, 2018, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6192572/, trad. a cura della laureanda.

KREIMEIER J. et al., *Two Decades of Touchable and Walkable Virtual Reality for Blind and Visually Impaired People: A High-Level Taxonomy*. volume 4, 2020, https://www.researchgate.net/publication/345983570_Two_Decades_of_Touchable_and_Walkable_Virtual_Reality_for_Blind_and_Visually_Impaired_People_A_High-Level_Taxonomy, trad. a cura della laureanda.

LAHAV O. et al., *A virtual environment for people who are blind. A usability study*. Journal of As-sistive Technologies. 2012, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3864668/, trad. a cura della laureanda.

LAHAV O. et al., *Rehabilitation program integrating virtual environment to improve O&M skills... (BlindAid)*, 2015, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360131514001766, trad. a cura della laureanda.

LAHAV O., VR *Systems as an Orientation Aid for People Who Are Blind to Acquire New Spatial Information*, 2022, 22 (4), 1307, https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1307, trad. a cura della laureanda.

LÉCUYER A., *Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo Haptic Feedback*, 2009, https://direct.mit.edu/pvar/article-abstract/18/1/39/18739/Simulating Haptic-Feedback-Using-Vision-A-Survey?redirectedFrom=fulltext, trad. a cura della laureanda.

C. LOSCOS et al., *The museum of pure form: touching real statues in an immersive virtual museum*, 2004, VAST'04: Proceedings of the 5th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, pag. 271 - 279, trad. a cura della laureanda.

MASSIE T. et al., *The PHANToM Haptic Interface: a Device for Probing Virtual Objects Available to Purchase*, 1994, https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings-abstract/IMECE94/14147/295/1227023, trad. a cura della laureanda.

MARCOLONGO A. (a cura di), Omero e i poemi epici, Torino 2022.

MARTINGANO A. et al., *VR improves emotional (non cognitive) empathy: meta-analysis*, 2021, https://psycnet.apa.org/fulltext/2021-53982-001.html, trad. a cura della laureanda.

PACCHIEROTTI C. et al., *Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives*, 2017, https://ieeexplore.ieee.org/document/7922602, trad. a cura della laureanda.

PRIVITERA G.A. et al. (a cura di), Omero, Odissea, Milano 2023, libri X, XI, XII e XXIII.

THEVIN L. et al., *Inclusive Adaptation of Existing Board Games for Gamers with and without Visual Impairments using a Spatial Augmented Reality Framework for Touch Detec-tion and Audio Feedback*, 2021, https://enac.hal.science/hal-03405986/file/ACM_Journals___For_ISS_Papart_Camera_Ready.pdf, trad. a cura della laureanda.

WEDOFF R. et al., *Virtual Showdown: An Accessible Virtual Reality Game with Scaffolds for Youth with Visual Impairments*, 2019, paper 141, https://dl.acm.org/doi/10.1145/3290605.3300371, trad. a cura della laureanda.

WIELAND M. et al., *Towards Inclusive Conversations in VR for People with Visual Impairments*, 2022, https://dl.gi.de/server/api/core/bitstreams/54742add-e79b-458b-8cd2-6cdbf40c4132/content, trad. a cura della laureanda.

WILSON M., *Six views of embodied cognition*, 2002, volume 9, https://link.springer.com/article/10.3758/BF03196322, trad. a cura della laureanda.

WU Q. et al, *Vipins: pin array + vibrotactile for shapes/textures*, 2025, https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.ijhcs.2025.103464, trad. a cura della laureanda.

ZAAL T. et al., *Toward inclusivity: Virtual reality museums for the visually impaired*, 2022, IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR), CA, USA, 2022, pp. 225-233, https://ieeexplore.ieee.org/document/10024485, trad. a cura della laureanda.

Sitografia

https://pninclusione21-27.lavoro.gov.it/sites/default/files/2023-10/Convenzione%20ONU.pdf
https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/strategy-for-the-rights-of-persons-with-disabilities.html
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0882
https://www.w3.org/Translations/WCAG22-it/#background-on-wcag-2
https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_3402_allegato.pdf
https://xraccess.org/
https://medium.com/visionari/la-mostra-che-rende-larte-accessibile-ai-non-vedenti-con-la-realt%C3%A0-virtuale-9da251d6ab72

APPENDICE A

Schemi progettuali del dispositivo

Questa appendice raccoglie gli schemi progettuali del dispositivo aptico sviluppato nell'ambito del progetto VidMentis. A differenza del Capitolo 6, in cui il sistema è stato descritto dal punto di vista funzionale e concettuale, qui vengono presentate rappresentazioni tecniche finalizzate a esplicitare la configurazione costruttiva e le relazioni tra i componenti.
Gli schemi permettono di comprendere nel dettaglio l'organizzazione del dispositivo, la distribuzione degli elementi sulla mano e il principio di funzionamento del sistema di trasmissione della forza.

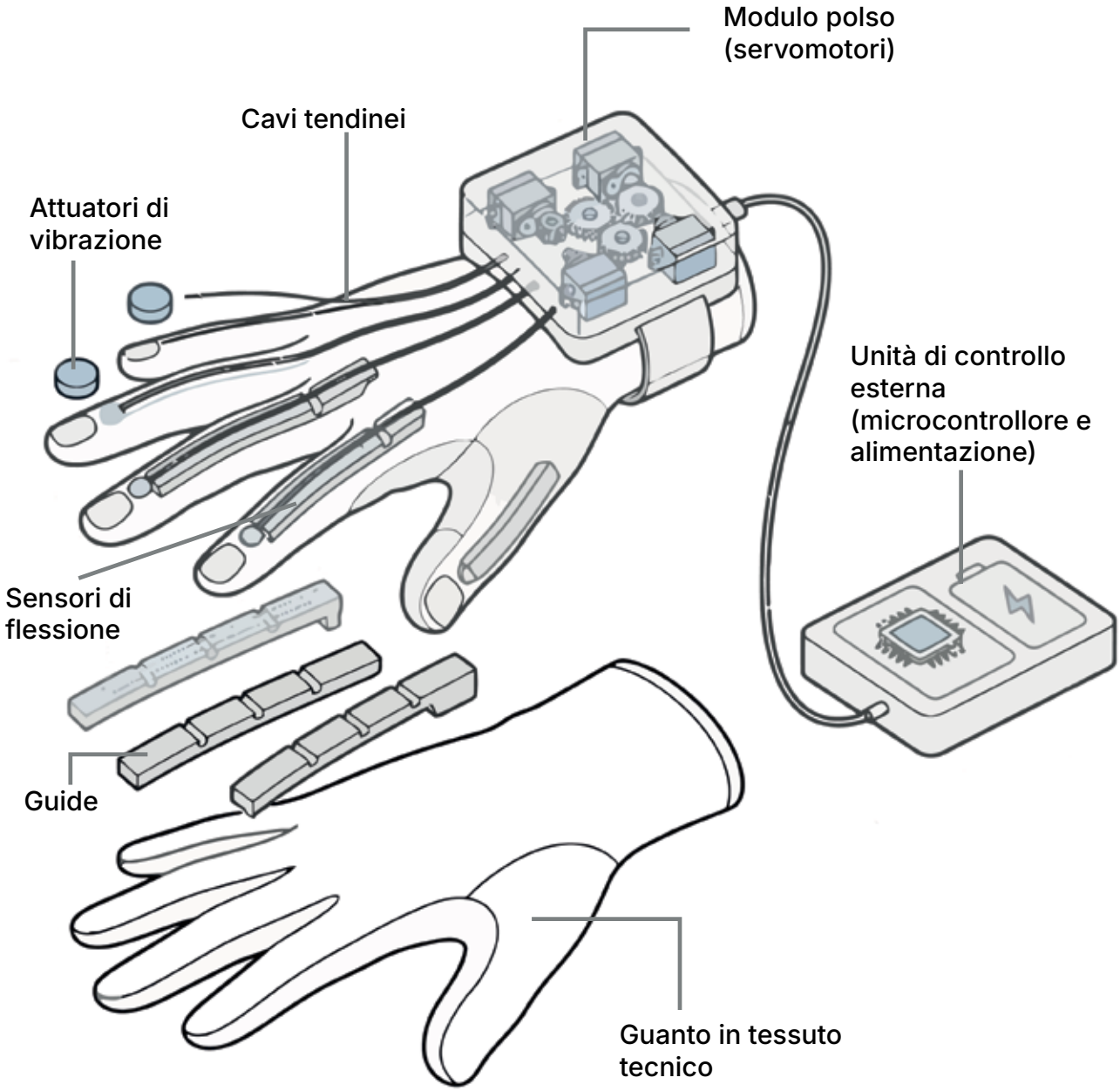


FIGURA A.1 Vista esplosa del dispositivo

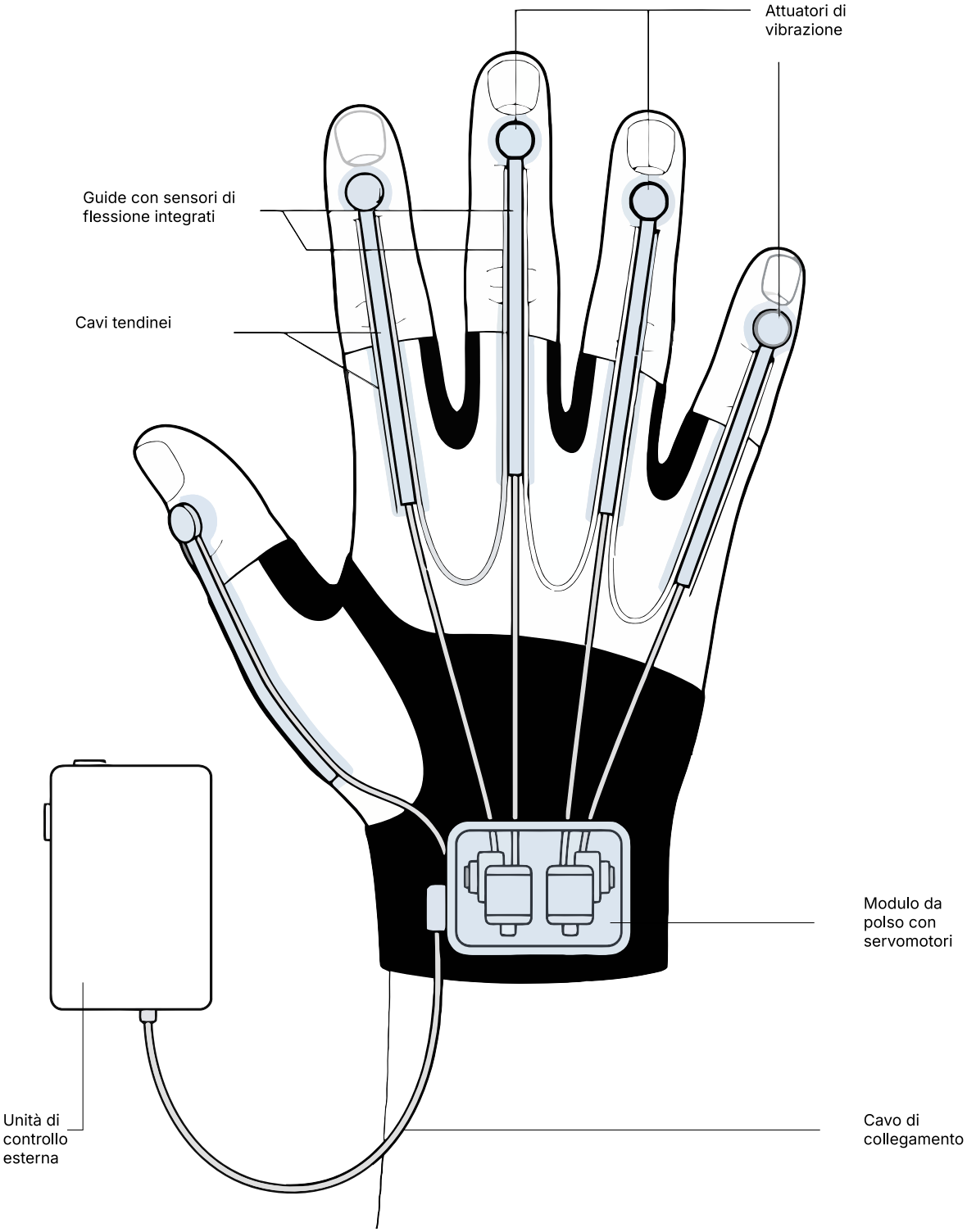


Figura A.2 Distribuzione dei componenti sulla mano

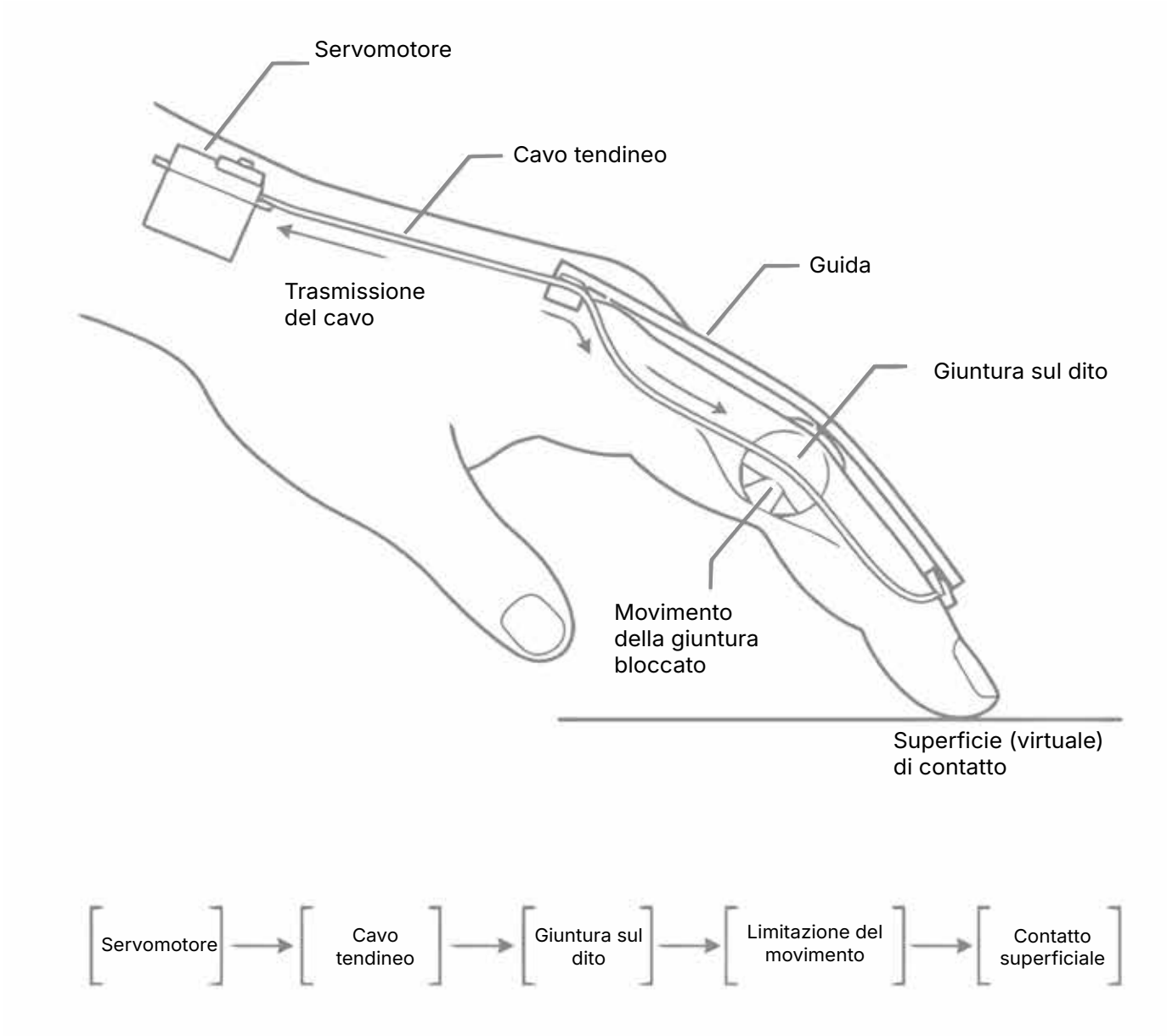


FIGURA A.3 Schema sistema tendon-driven

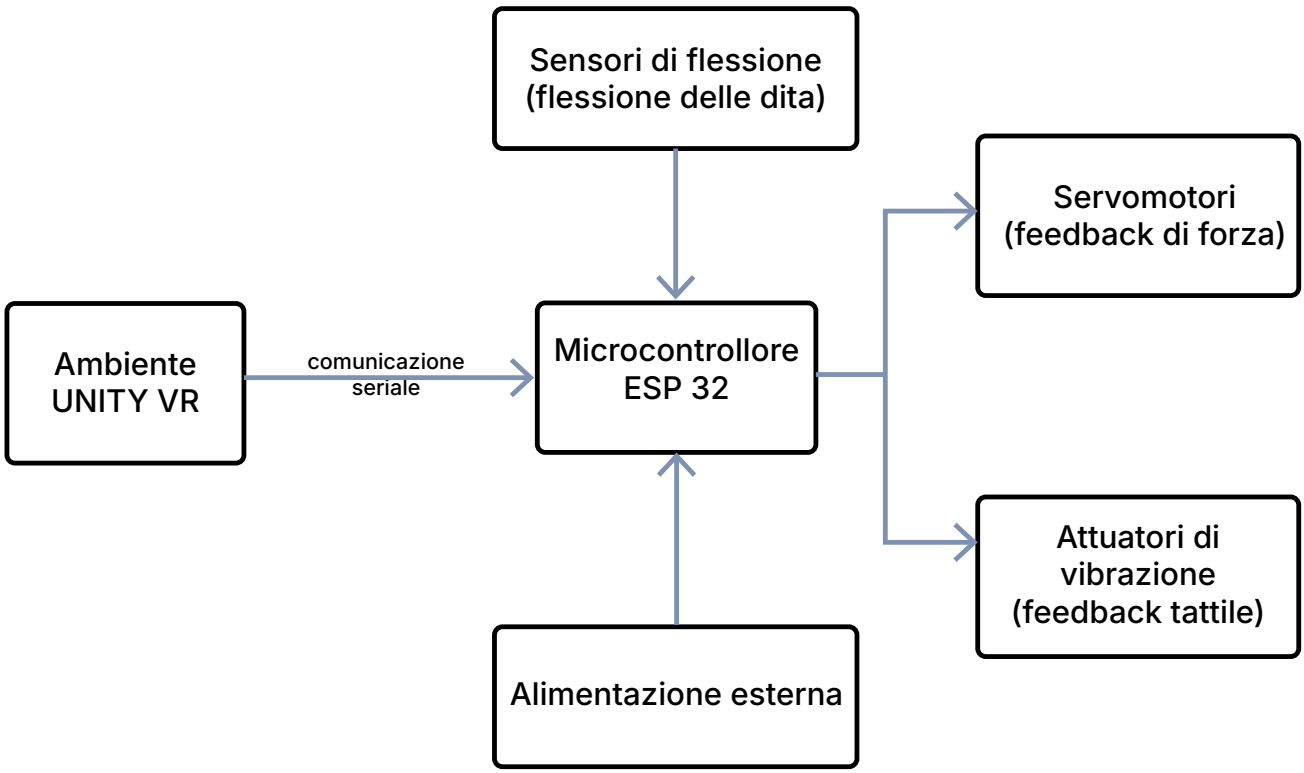


FIGURA A.4 Schema connessioni sistema

APPENDICE B

Architettura del sistema (hardware + software)

Questa appendice presenta l'architettura tecnica del sistema VidMentis, mettendo in relazione le componenti software e hardware che permettono la generazione del feedback aptico. A differenza della trattazione del Capitolo 6, qui il sistema viene rappresentato attraverso schemi funzionali che evidenziano il flusso dei dati e le interazioni tra i diversi moduli.
L'obiettivo è esplicitare la pipeline che collega l'ambiente virtuale alla risposta fisica percepita dall'utente.

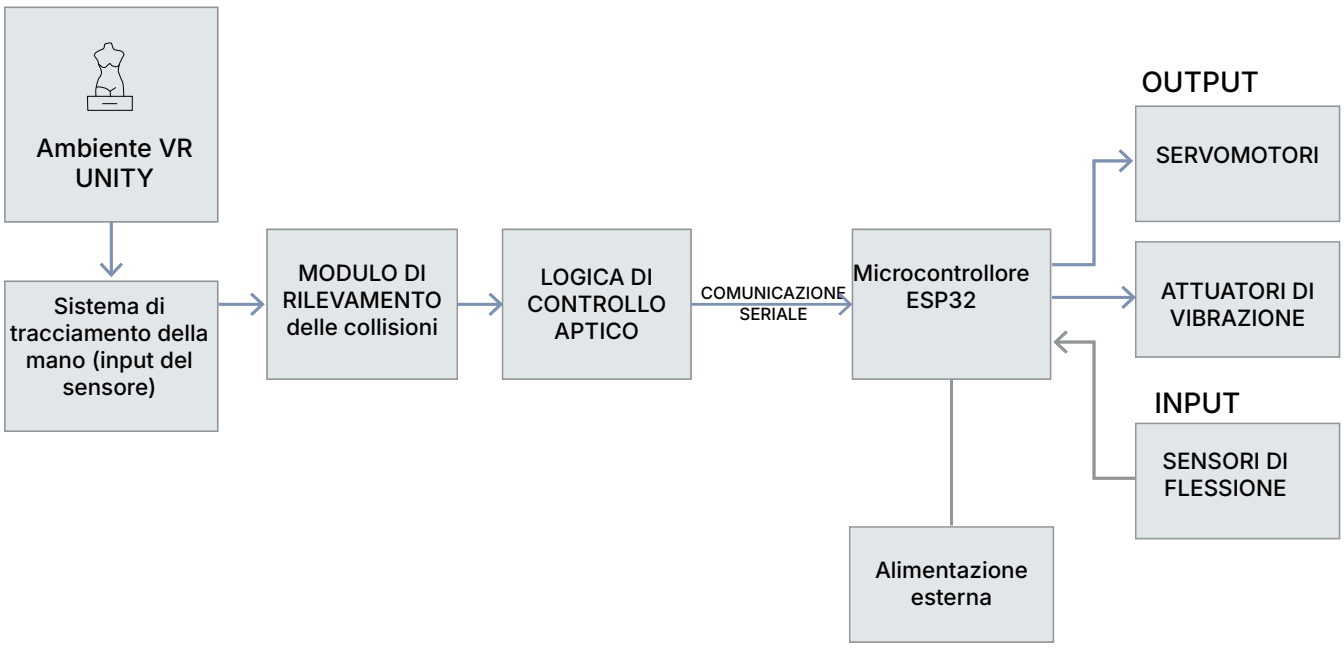


FIGURA B.1 Architettura generale

La figura rappresenta l'architettura complessiva del sistema, evidenziando la relazione tra ambiente virtuale e dispositivo fisico. Il flusso parte dall'interazione dell'utente nello spazio VR e attraversa una serie di moduli di elaborazione fino alla generazione del feedback aptico. La distinzione tra componente software e hardware consente di comprendere il ruolo di ciascun elemento nella pipeline.

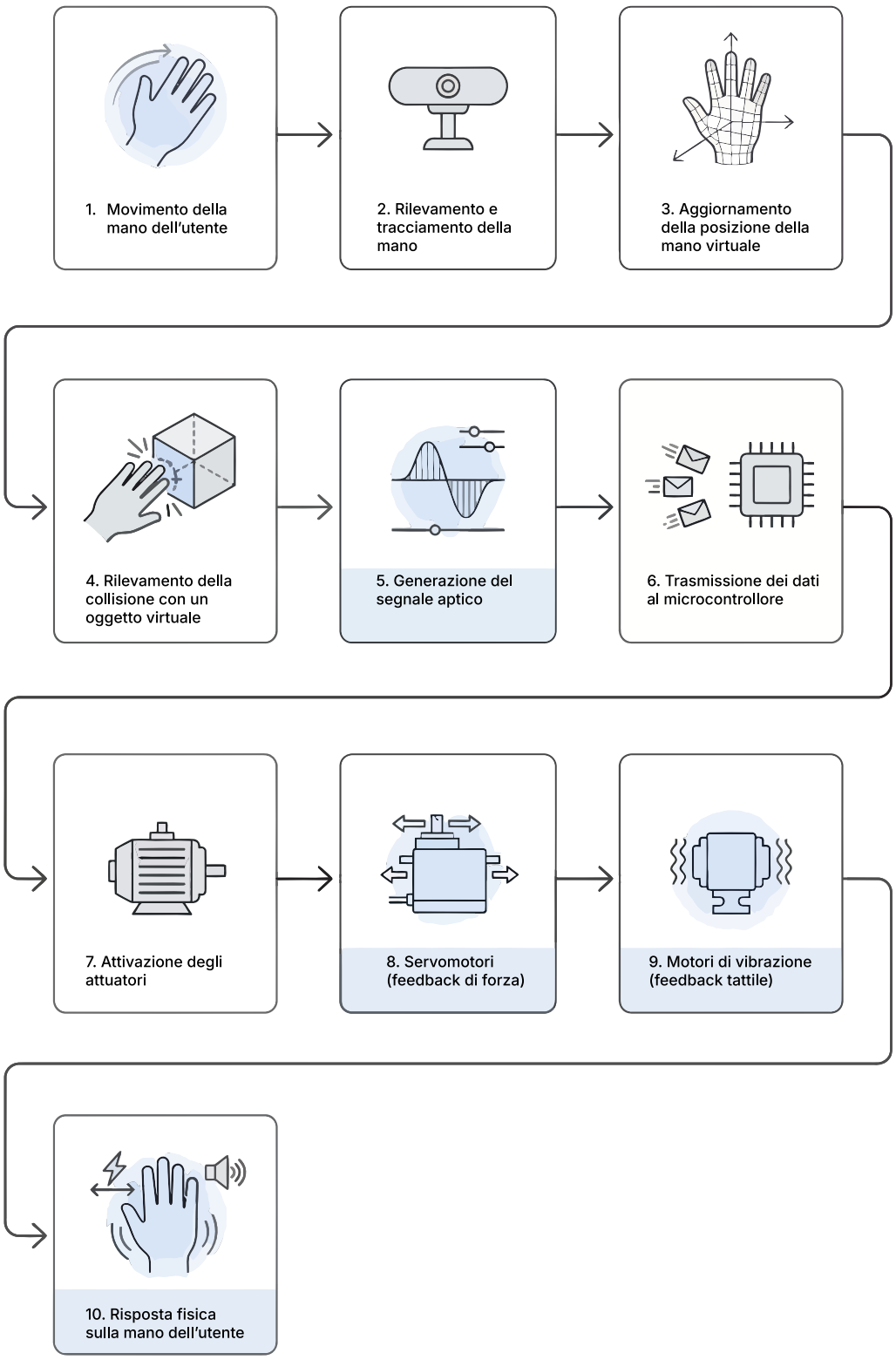


FIGURA B.2 Flusso di interazione (pipeline evento → risposta)

La figura descrive la sequenza di eventi che collega il movimento della mano alla risposta aptica. Il processo evidenzia il passaggio da un input fisico a un'elaborazione digitale e, successivamente, alla restituzione di uno stimolo fisico. Questa rappresentazione permette di leggere il sistema come una catena continua di trasformazioni.

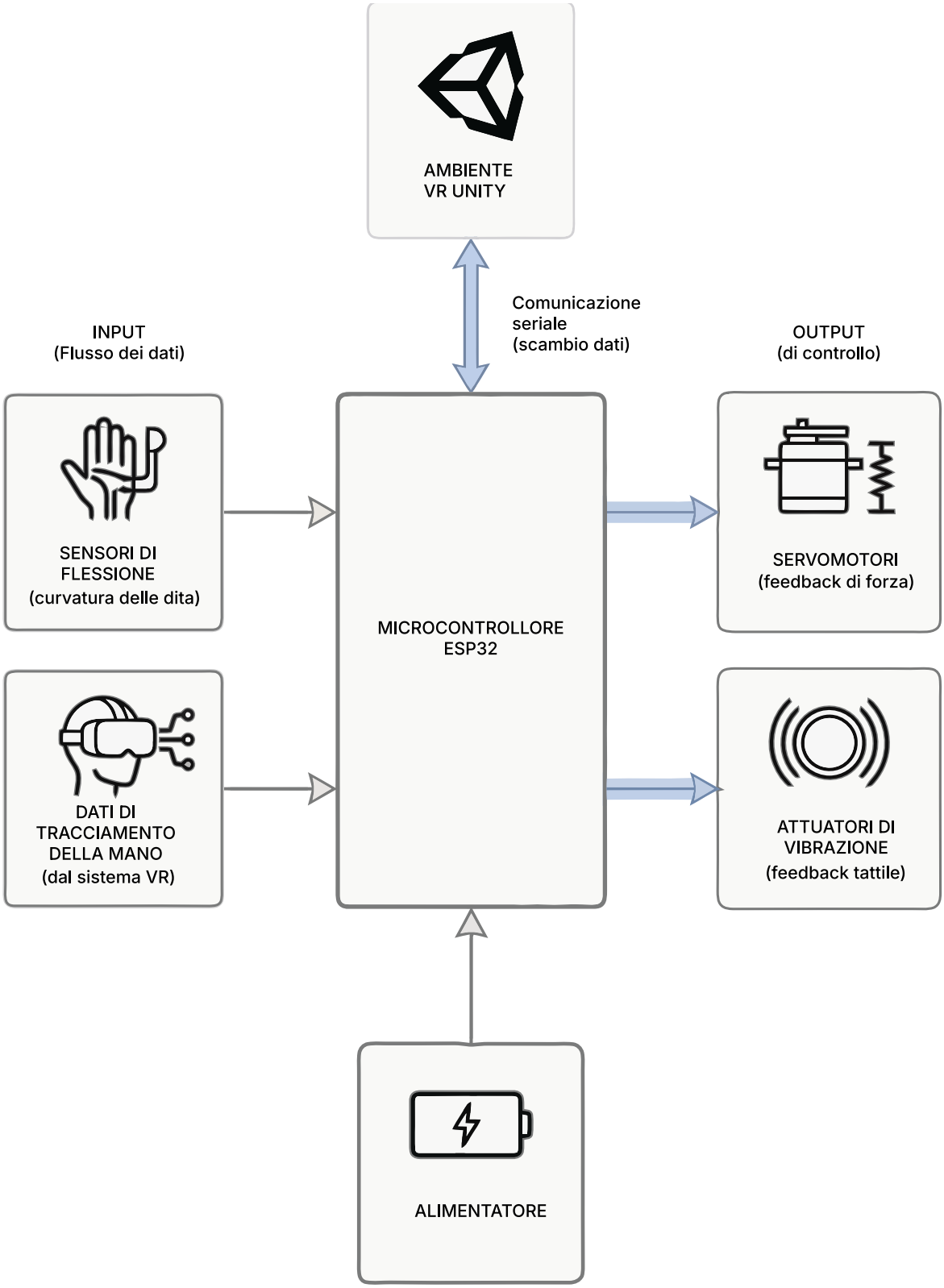


FIGURA B.3 Sistema bidirezionale (input + output)

La figura descrive la sequenza di eventi che collega il movimento della mano alla risposta aptica. Il processo evidenzia il passaggio da un input fisico a un'elaborazione digitale e, successivamente, alla restituzione di uno stimolo fisico. Questa rappresentazione permette di leggere il sistema come una catena continua di trasformazioni.

APPENDICE C

Dettagli tecnici e componenti

Questa appendice raccoglie i principali dettagli tecnici relativi ai componenti utilizzati nello sviluppo del dispositivo VidMentis. L'obiettivo è fornire una panoramica delle scelte progettuali adottate, evidenziando le caratteristiche dei sensori, degli attuatori e dell'unità di controllo.
Le informazioni qui riportate non hanno finalità puramente descrittive, ma contribuiscono a chiarire i vincoli tecnici e le logiche che hanno guidato la progettazione del sistema.

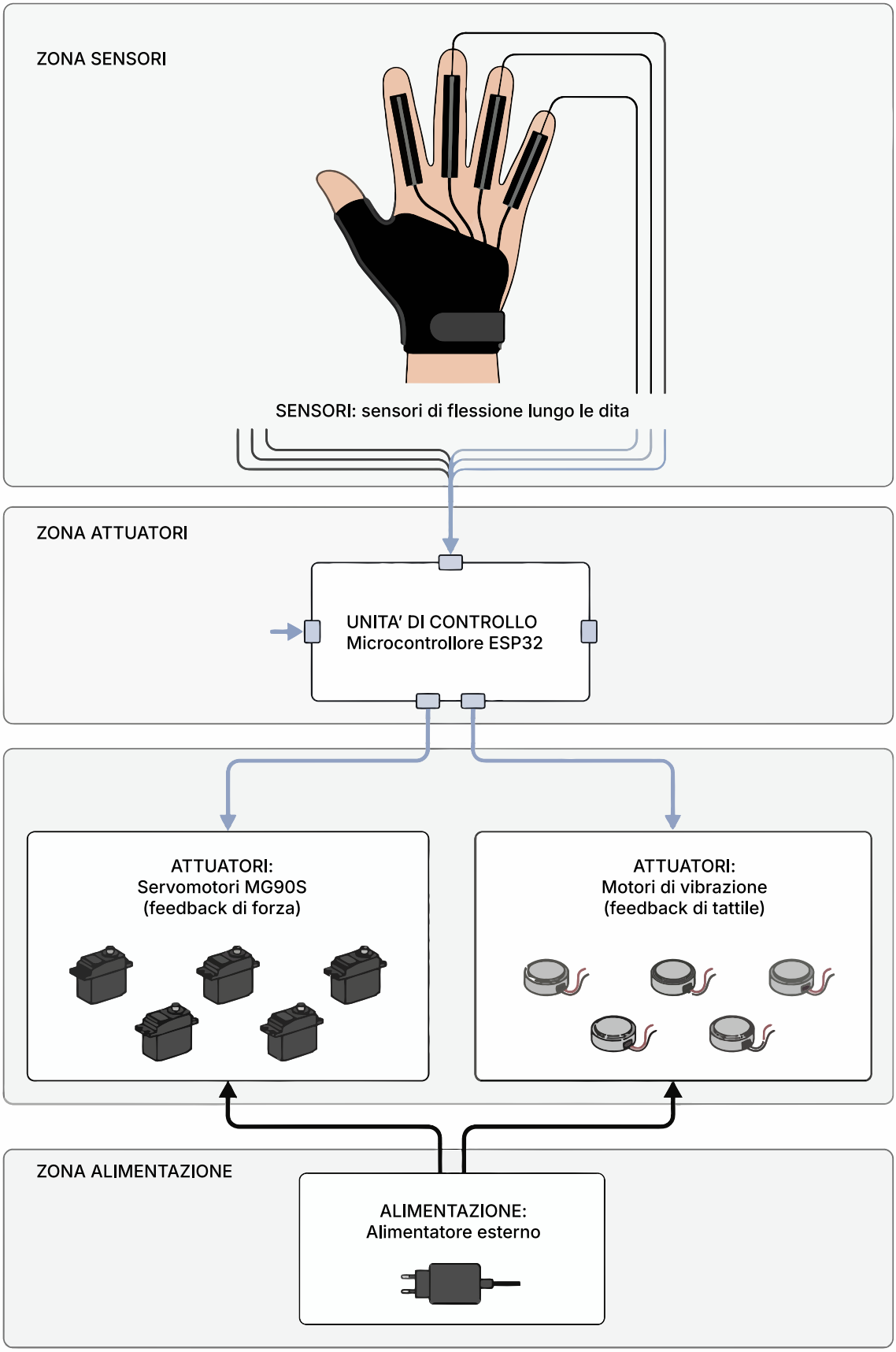


FIGURA C.1a Schema componenti del dispositivo

Componente	Funzione	Posizione	Motivazione scelta
ESP32	Controllo del sistema	Unità esterna	Compatto, Wifi, costo ridotto
Servomotori	Generazione forza	Modulo polso	Coppia elevata, controllo preciso
Sensori di flessione	Rilevamento curvatura	Dita	Semplicità di integrazione
Attuatori di vibrazione	Feedback tattile	Estremità delle dita	Alta sensibilità percettiva
Alimentazione	Energia al sistema	Unità esterna	Riduzione peso sulla mano

FIGURA C.1b Tabella componenti

Il sistema VidMentis è composto da una serie di componenti che operano in modo integrato per garantire la generazione del feedback aptico. La scelta degli elementi non è stata guidata esclusivamente da criteri prestazionali, ma anche da considerazioni legate all'ingombro, al peso e alla semplicità di integrazione.
Il microcontrollore ESP32 rappresenta il centro di gestione del sistema e si occupa della lettura dei dati provenienti dai sensori e del controllo degli attuatori. La sua adozione consente di mantenere una struttura compatta e facilmente programmabile, garantendo al tempo stesso una buona capacità di elaborazione.
I sensori di flessione installati lungo le dita permettono di rilevare la configurazione della mano, fornendo informazioni essenziali per la sincronizzazione tra movimento reale e ambiente virtuale. Questi sensori, pur essendo relativamente semplici, risultano adeguati per il tipo di interazione previsto.
Per la generazione del feedback di forza sono stati utilizzati servomotori collegati a un sistema di trasmissione a cavi. Questa soluzione consente di ottenere una risposta meccanica efficace mantenendo una struttura relativamente leggera sulla mano. La collocazione dei servomotori sul polso contribuisce a ridurre l'ingombro sulle dita, migliorando la libertà di movimento.
Gli attuatori vibrazionali, posizionati sulle estremità delle dita, permettono di integrare una componente percettiva aggiuntiva, utile per la restituzione di dettagli superficiali e per il supporto all'orientamento nello spazio.
Infine, la scelta di separare l'unità di alimentazione dal dispositivo indossabile risponde all'esigenza di ridurre il peso e migliorare il comfort durante l'utilizzo prolungato. Questa configurazione rende il sistema più ergonomico, pur mantenendo la piena funzionalità.

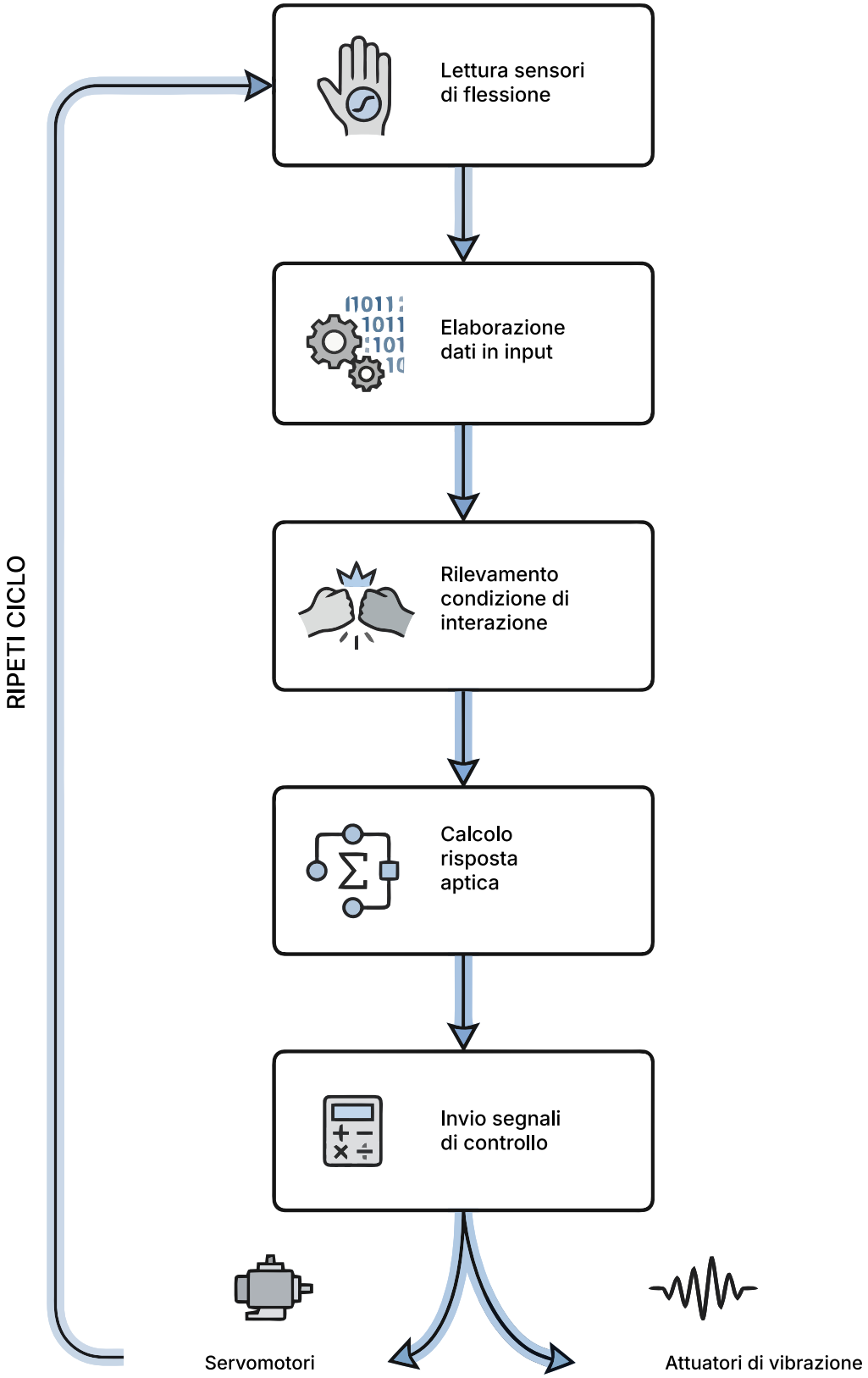


FIGURA C.2 Flusso logico di controllo

APPENDICE D

Processo di sviluppo e prototipazione

Questa appendice descrive il processo di sviluppo del dispositivo VidMentis, evidenziando le principali fasi di progettazione, prototipazione e validazione. A differenza dei capitoli precedenti, in cui il sistema è stato presentato nella sua configurazione finale, qui viene ricostruito il percorso che ha portato alla definizione del dispositivo, mettendo in luce le criticità emerse e le soluzioni adottate.
L'obiettivo è restituire una visione concreta del processo progettuale, evidenziando l'evoluzione del sistema nel tempo.

EVOLUZIONE DEL PROTOTIPO

Lo sviluppo del dispositivo è stato articolato in più fasi successive, ciascuna orientata a verificare specifici aspetti del sistema. In una prima fase è stato realizzato un prototipo semplificato, focalizzato su un singolo dito, con l'obiettivo di testare il funzionamento del sistema tendon-driven e valutare la risposta dei servomotori in relazione al movimento.
Questa configurazione iniziale ha permesso di osservare il comportamento del sistema in condizioni controllate, evidenziando alcune criticità legate alla gestione della tensione dei cavi e alla fluidità del movimento. In particolare, è emersa la necessità di migliorare l'allineamento tra guida e dito per ridurre attriti e instabilità.
Successivamente, il sistema è stato esteso a due dita, introducendo una maggiore complessità nella gestione dei segnali e nella sincronizzazione dei movimenti. Questa fase ha consentito di verificare la scalabilità della soluzione e di affinare il controllo dei servomotori, migliorando la coerenza del feedback.
La versione finale del dispositivo è stata sviluppata integrando tutte le componenti progettate, con una particolare attenzione alla distribuzione degli elementi sulla mano e al comfort dell'utente. La separazione dell'unità di controllo e alimentazione ha rappresentato una scelta fondamentale per ridurre il peso del sistema indossabile.

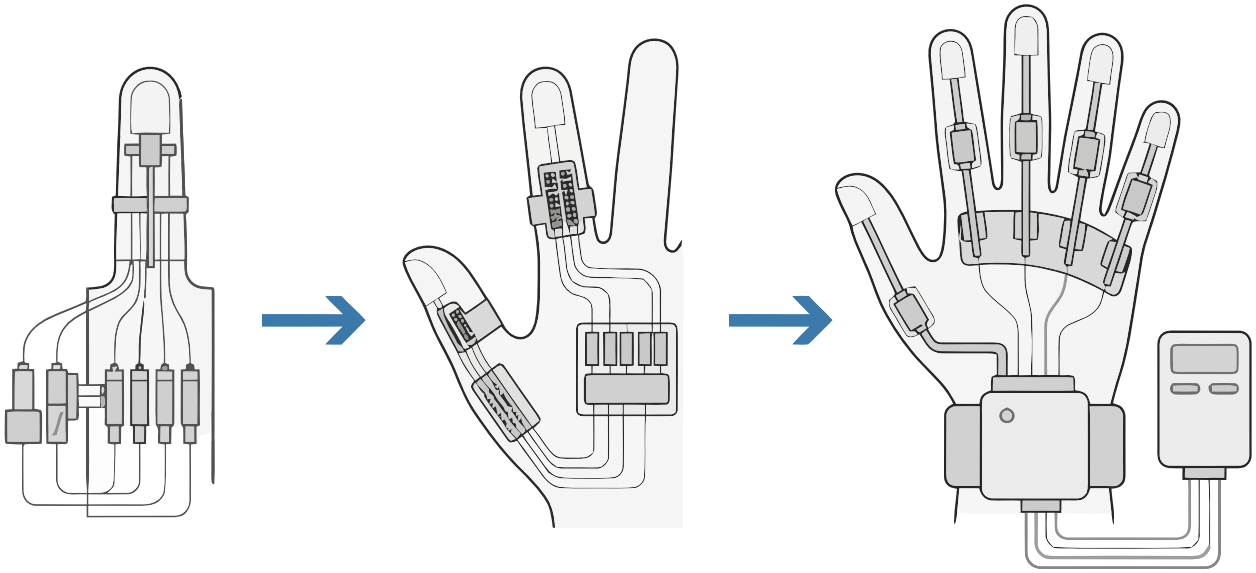


FIGURA D.1 Schema componenti del dispositivo

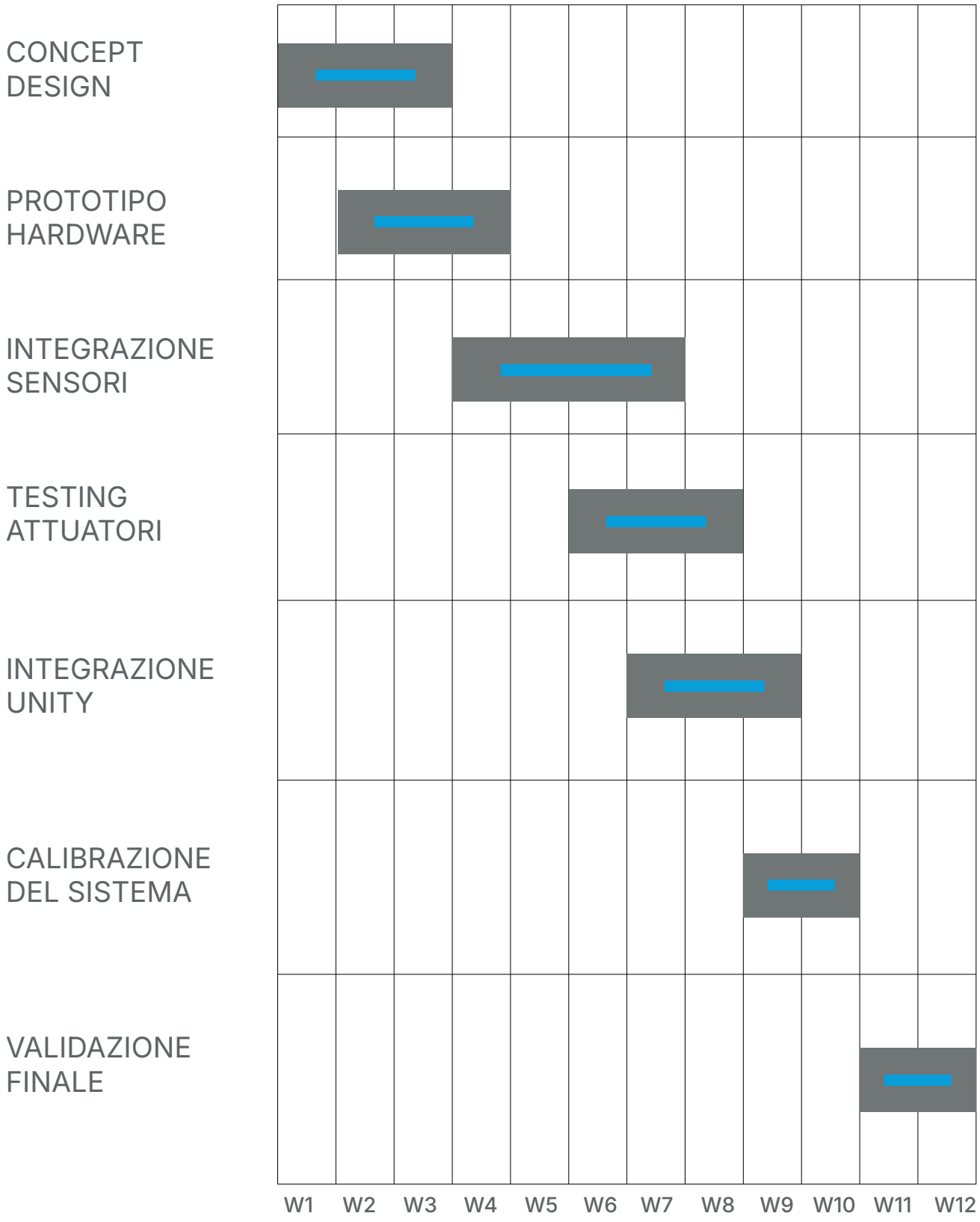


FIGURA D.2 GANTT di sviluppo

CRITICITÀ E SOLUZIONI

Durante lo sviluppo sono emerse diverse criticità legate sia agli aspetti meccanici sia a quelli di integrazione tra hardware e software. Una delle principali difficoltà ha riguardato la gestione della tensione nei cavi, che in alcune configurazioni generava movimenti poco fluidi o risposte non coerenti con l'interazione virtuale.
Per risolvere questo problema è stato necessario intervenire sulla progettazione delle guide, migliorandone l'allineamento rispetto alle falangi e riducendo gli attriti. Questo ha permesso di ottenere una trasmissione più stabile della forza e una maggiore precisione nel controllo.
Un'ulteriore criticità ha riguardato la distribuzione dei componenti sulla mano. Le prime configurazioni risultavano sbilanciate e poco confortevoli, soprattutto in presenza dei servomotori. La scelta di spostare questi ultimi sul polso e di separare l'unità di controllo ha migliorato significativamente l'ergonomia del dispositivo.
Dal punto di vista del controllo, è stato necessario ottimizzare la comunicazione tra ambiente virtuale e microcontrollore per garantire una risposta in tempo reale. La sincronizzazione tra rilevazione del movimento e attivazione del feedback si è rivelata un elemento centrale per la qualità dell'esperienza.

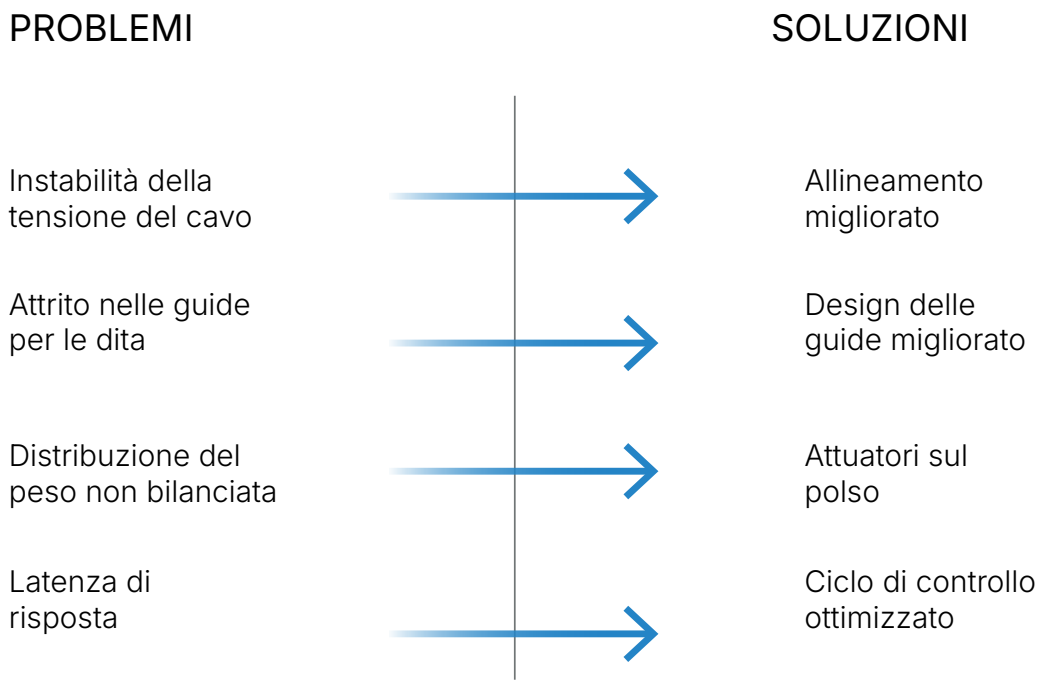


FIGURA D.3 Schema criticità - soluzioni

Nel complesso, il processo di sviluppo ha permesso di affinare progressivamente il dispositivo, passando da configurazioni sperimentali a una soluzione più stabile e integrata. Le iterazioni progettuali hanno avuto un ruolo fondamentale nel migliorare le prestazioni del sistema e nel definire una configurazione coerente con gli obiettivi dell'esperienza.

RINGRAZIAMENTI

Questo percorso nasce da un'esigenza personale e professionale: il bisogno di mettermi nuovamente in discussione, di cercare nuovi stimoli e di continuare a formarmi per poter essere, ogni giorno, un'insegnante migliore per i miei studenti.

Desidero esprimere un sincero e profondo ringraziamento al Prof. Daniele Rossi, che è stato per me un punto di riferimento fondamentale non solo durante lo sviluppo di questo lavoro, ma lungo tutto il mio percorso da studentessa. La sua disponibilità, la capacità di ascolto e la fiducia che ha saputo trasmettermi hanno rappresentato un sostegno costante, accompagnandomi nelle scelte e nelle difficoltà incontrate durante questo percorso.

Ringrazio il Prof. Francesco Pezzuoli, correlatore di questa tesi, per aver contribuito ad alimentare la mia curiosità e il mio interesse verso i temi della progettazione inclusiva. Il suo contributo è stato per me uno stimolo importante, che mi ha permesso di approfondire un ambito di ricerca che sento oggi particolarmente vicino.

Un sentito ringraziamento va all'Università, a tutti i docenti e alle persone che, a diverso titolo, hanno preso parte a questo percorso formativo. Ognuno ha contribuito, in maniera diretta o indiretta, alla mia crescita culturale e personale, fornendomi strumenti, visioni e competenze fondamentali per lo sviluppo di questo progetto. Un ringraziamento particolare anche alla segreteria studenti, per il supporto e la disponibilità dimostrati nel corso degli anni.

Desidero inoltre ringraziare il Museo Tattile Statale Omero, nella persona del Presidente Prof. Aldo Grassini, per l'interesse dimostrato nei confronti del progetto e per l'attenzione rivolta ai temi dell'accessibilità e dell'inclusione, che hanno costituito il cuore di questo lavoro.

Ringrazio i miei compagni di corso, che nonostante la mia distanza fisica dall'università hanno sempre trovato il modo di coinvolgermi, facendomi sentire parte integrante di questo percorso. La condivisione, il confronto e il supporto reciproco hanno reso questo cammino più ricco e significativo.

Desidero rivolgere un pensiero anche ai miei studenti. Le esperienze e gli stimoli raccolti durante questo percorso sono stati portati in aula, con la speranza di aver contribuito a stimolare curiosità e interesse verso la ricerca e l'innovazione.

Un grazie sincero va anche ai miei amici, che hanno sempre accolto con entusiasmo le mie scelte, anche quando apparivano complesse o fuori dagli schemi. Il loro incoraggiamento e la loro fiducia sono stati per me un sostegno importante nei momenti di maggiore impegno.

Desidero ringraziare i colleghi per il supporto e il confronto offerti nel corso di questo percorso. In particolare, Marianna e Michele per la disponibilità dimostrata.

Un ringraziamento speciale è rivolto alla mia famiglia, che ha rappresentato il punto di equilibrio durante tutto questo percorso. Ringrazio mia madre, per il supporto costante e incondizionato; le mie sorelle e i miei nipoti, per la loro presenza e per l'affetto che non è mai mancato. Un pensiero particolare va anche a Pina e Alessandro, che si sono sempre presi cura di me con attenzione e disponibilità.
Desidero inoltre ringraziare la famiglia di mio marito, per l'entusiasmo con cui ha accolto questo percorso e per il sostegno dimostrato nel tempo.

Ringrazio mio marito, che mi ha accompagnato con pazienza, comprensione e incoraggiamento lungo tutto questo percorso. Il suo supporto è stato fondamentale, soprattutto nei momenti più impegnativi, come le partenze da Ancona prima all'alba per raggiungere le lezioni ad Ascoli.

Infine, un pensiero va a chi non c'è più: a mio padre e ai miei nonni, che mi hanno trasmesso valori profondi e duraturi. Il loro insegnamento continua a vivere nelle mie scelte e rappresenta una guida silenziosa nel mio percorso.

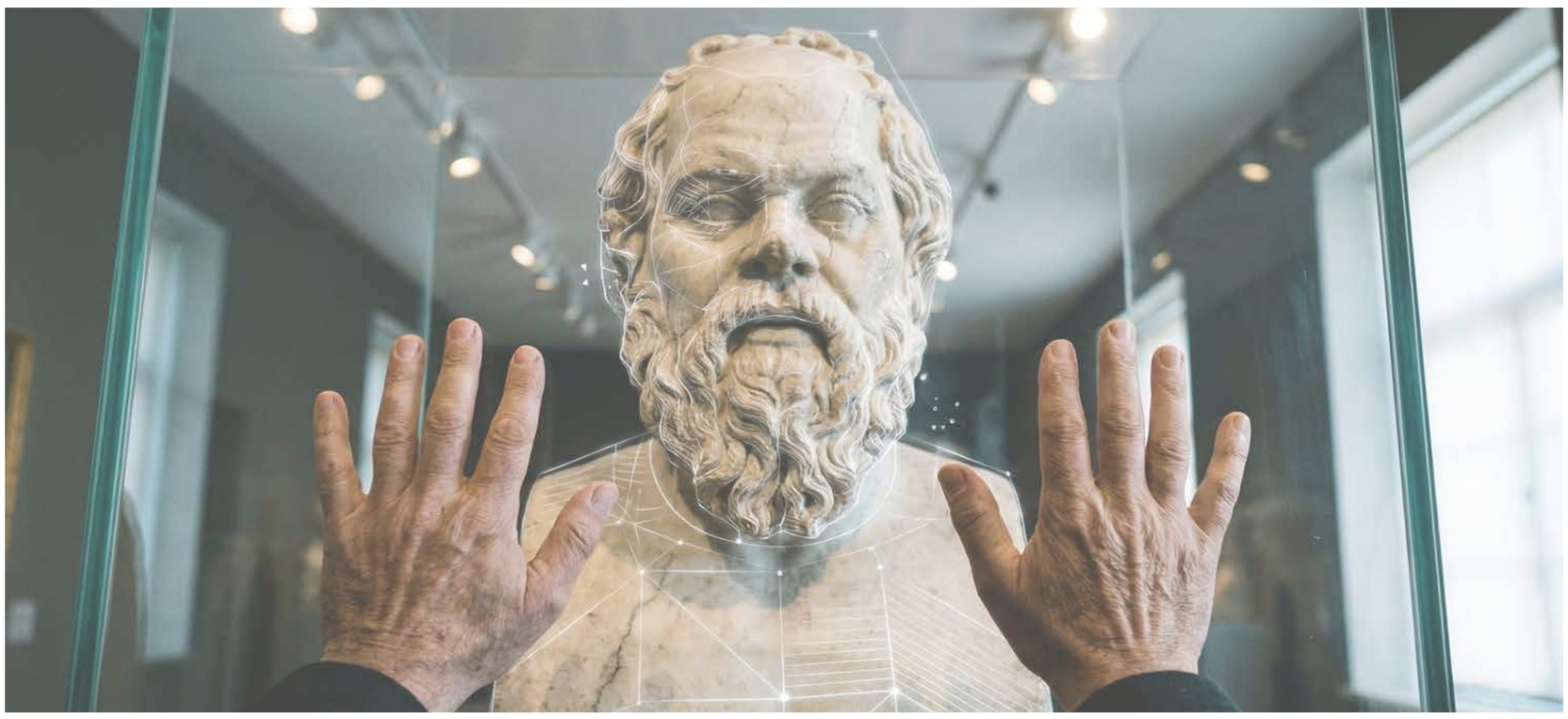
Questo lavoro rappresenta per me non solo il completamento di un percorso di studi, ma una tappa significativa di un cammino più ampio, fatto di ricerca, crescita e desiderio di contribuire, attraverso il progetto, a costruire esperienze più accessibili e inclusive.

VidMentis

Progettazione di un dispositivo aptico per l'esplorazione esperienziale dell'arte in realtà virtuale

VEDERE CON LE MANI
Oltre la barriera visiva

L'arte è un diritto, non un privilegio visivo.
Il progetto esplora modalità di fruizione non visive attraverso tecnologie aptiche e ambienti virtuali, trasformando l'osservazione in esplorazione attiva



SCENARIO DI RICERCA

LIMITI ATTUALI E BISOGNI COGNITIVI

01 **IL PRIMATO DELLA VISTA**

Nei musei tradizionali il contatto fisico con le opere è vietato per ragioni di conservazione.
Questo esclude le persone non vedenti dalla comprensione diretta di forma e materia

02 **BARRIERE PERCETTIVE**

Le didascalie sono spesso esclusivamente visive (font piccoli, basso contrasto).
Le audioguide descrivono l'opera, ma non permettono una rappresentazione spaziale autonoma

03 **LA NECESSITÀ TATTILE**

L'esplorazione aptica non è un surrogato della vista, ma un canale cognitivo autonomo.
Permette di comprendere volume, texture e temperatura, trasformando la visita da passiva a attiva

CASI STUDIO

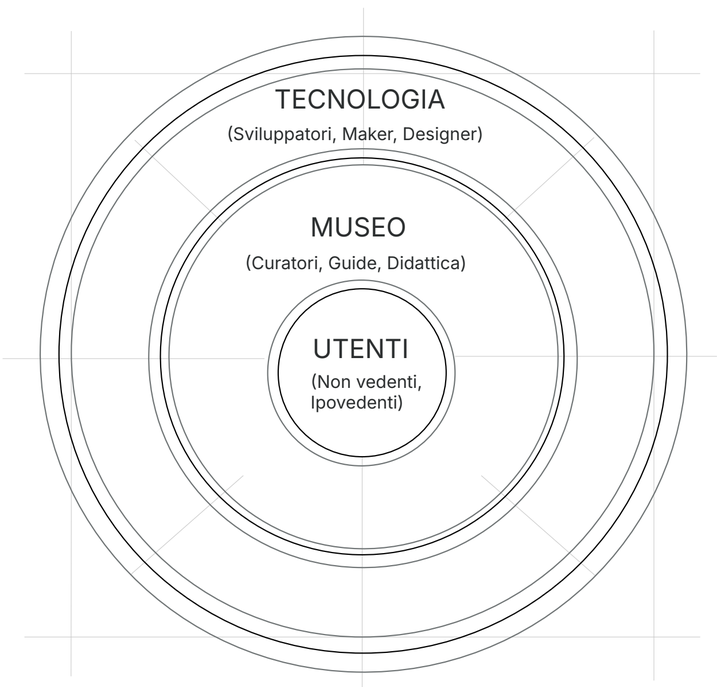
Museo Statale Tattile Omero (ANCONA)
COPIA FISICA

Touching the Prado (MADRID)
STAMPA A RILIEVO(Tecnologia Didú)

Touching Masterpieces (PRAGA)
HAPTIC GLOVES VR

FRAMEWORK

MAPPATURA DEGLI STAKEHOLDER



PARAMETRI PERCETTIVI

CECITÀ TOTALE (NON VEDENTI)

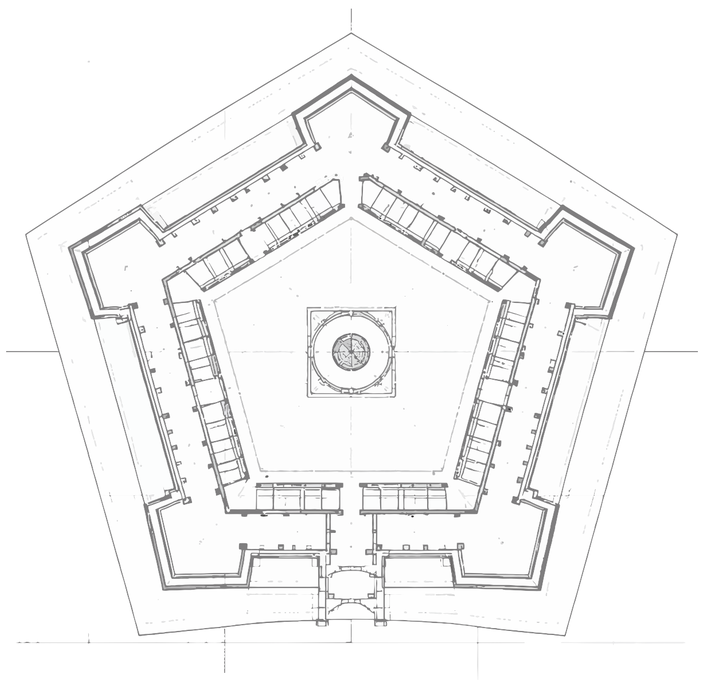
Sostituzione sensoriale completa.
Traduzione dell'input visivo in feedback aptico e audio spaziale, per la costruzione mentale della forma

IPOVISIONE

Potenziamento del residuo visivo.
Alto contrasto, ingrandimento e controllo della luce per migliorare leggibilità e percezione

SCENARIO DI INTERVENTO

Estensione digitale delle opere del Museo Tattile Omero per l'esplorazione aptica in realtà virtuale



UNICAM Università di Camerino 1336
S A A D
Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

Laureanda: Catia Pedace
Sessione di laurea 9 aprile 2026
VIDMENTIS - Progettazione di un dispositivo aptico per l'esplorazione esperienziale dell'arte in realtà virtuale

Relatore: Prof. Daniele Rossi
Correlatore: Prof. Francesco Pezzuoli

Corso di Laurea in
Design per l'Innovazione Digitale
"Scuola di Architettura e Design E. Vittoria "
Univerità di Camerino

CONCEPT

REALTÀ IBRIDA

SINCRONIZZAZIONE TRA MATERIA E DATO

Realtà ibrida_ Integrazione tra opera fisica e digital twin per accesso multisensoriale

Sincronizzazione_ Allineamento in tempo reale tra gesto, contatto e feedback aptico

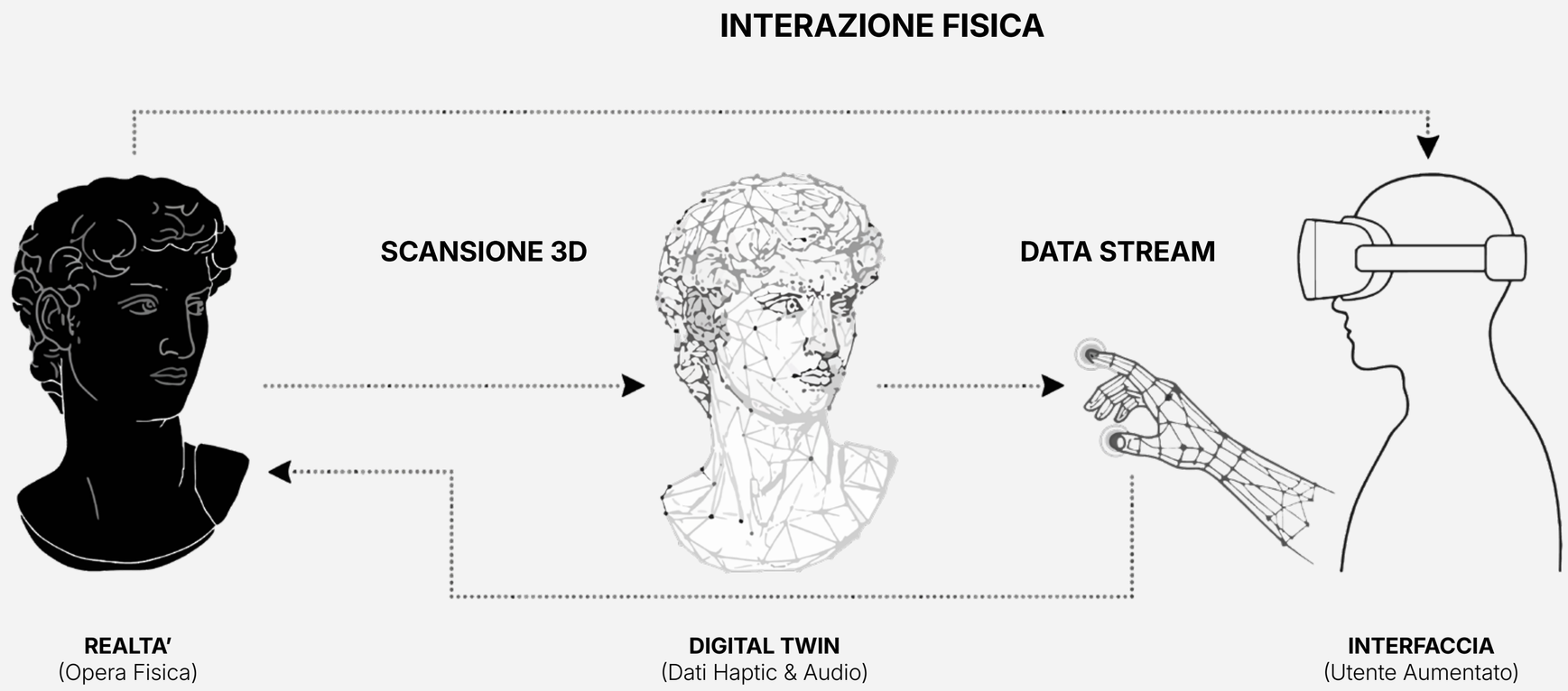
Interfaccia invisibile_ Dispositivo indossabile non invasivo

DRIVER DI PROGETTO

Sincronia < 20 ms

Digital Twin 1:1

Feedback localizzato (indice, pollice)



INPUT SYSTEM

Tracking: 6DOF (Oculus Insight)

Hand Recognition: Ottico + IR

Latenza: < 20ms

PROCESSING

Digital Twin: Nuvola di punti 4K

Sync Engine: Real-time Unity 3D

Mapping: 1:1 (scala reale)

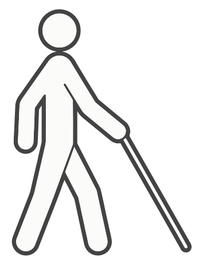
OUTPUT HAPTIC

Feedback: Attuatori LRA (Linear Resonant)

Audio: Binaurale Spazializzato

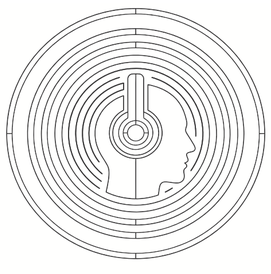
Range Frequenza: 150Hz - 300 Hz

OBIETTIVI



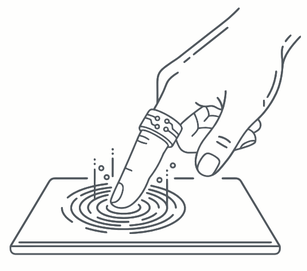
01 AUTONOMIA

Esplorazione autonoma e costruzione di una mappa mentale



02 IMMERSIVITÀ

Riduzione del rumore percettivo e maggiore concentrazione sull'opera



03 NON-INVASIVITÀ

Dispositivo discreto che non altera la percezione dell'opera

STORYTELLING

FASE A: SETUP

SETUP UTENTE

Preparazione e verifica del sistema. Posizionamento stabile dell'utente per comfort, sicurezza e corretto allineamento

SETUP DISPOSITIVO

Applicazione del visore e del guanto aptico. Regolazione di indice e pollice per tracciamento preciso e feedback accurato

INIZIALIZZAZIONE

Avvio del sistema e calibrazione dei dispositivi.
Verifica della corretta sincronizzazione tra input e feedback

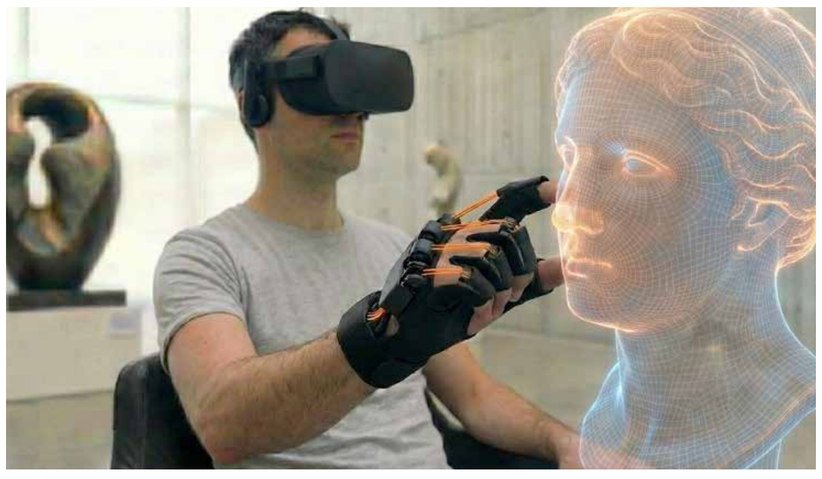
FASE B: INTERAZIONE

NAVIGAZIONE

L'utente accede all'esperienza e individua l'opera tramite interfaccia audio e feedback direzionale senza controller

FEEDBACK APTICO

Il contatto con la superficie virtuale attiva il sistema aptico.
La resistenza e la vibrazione restituiscono informazioni locali



ESPLORAZIONE

L'utente esplora l'opera attraverso il movimento della mano.
Forza, vibrazione e audio contribuiscono alla costruzione della forma

ARCHITETTURA

Integrazione hardware-software e flusso di generazione del feedback aptico

PIPELINE DEL SISTEMA

INPUT

UNITY VR
- Tracking (6DOF)
- Collisione

DATI DI INTERAZIONE
- Punto di contatto
- normale
- distanza

PROCESSING

ESP32
(UNITA' DI CONTROLLO)
- parsing dati
- logica feedback
- gestione attuatori

INTERFACCIA SERIALE
115200 baud

OUTPUT

ATTUAZIONE APTICA
- servomotori
- vibrazione (LRA)

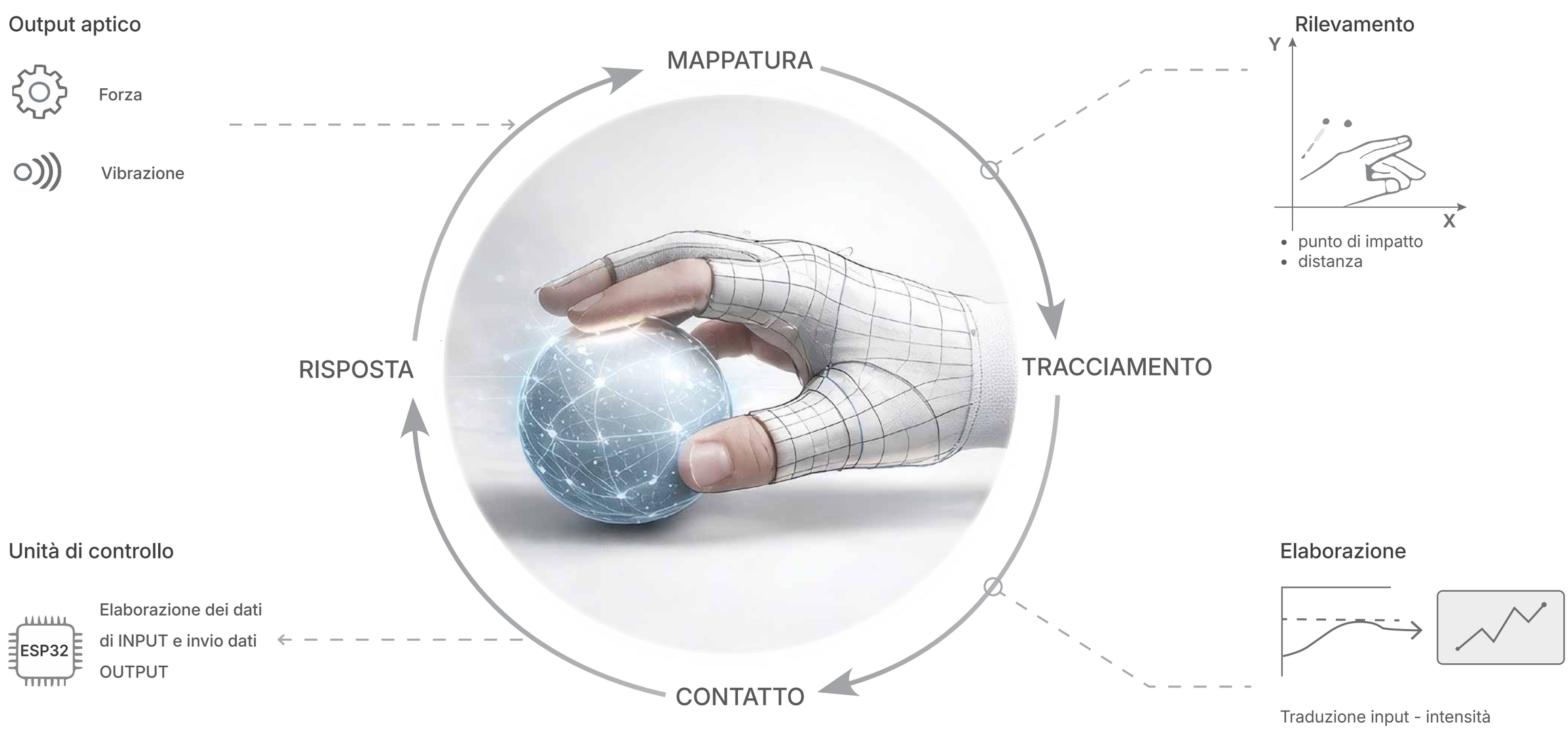
FEEDBACK UTENTE
- forza
- vibrazione localizzata

CONTROLLO

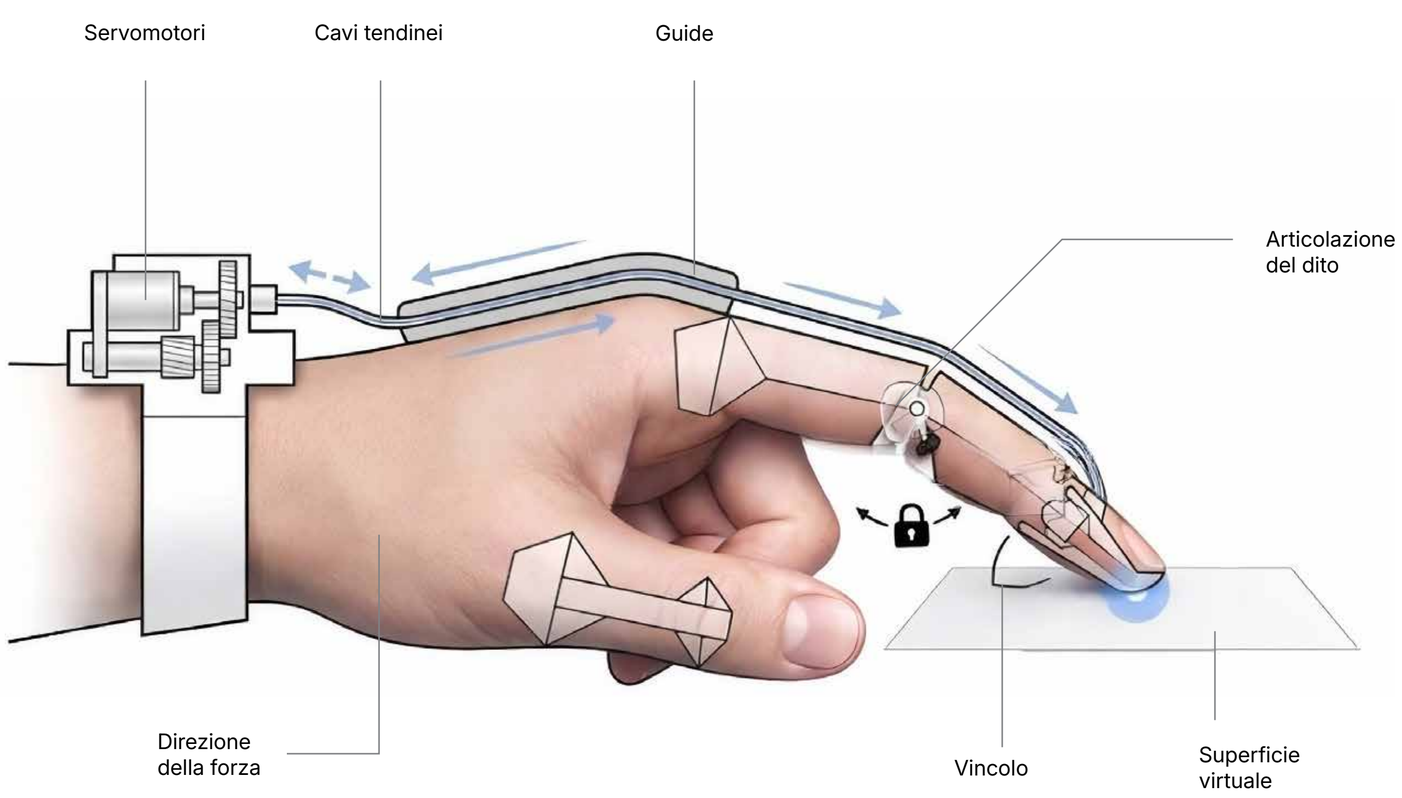
INPUT HARDWARE
- sensori di flessione (indice, pollice)

OUTPUT HARDWARE
- driver PWM (DRV2605L)
- attuatori

CICLO DI FEEDBACK APTICO IN REAL TIME



SISTEMA TENDON DRIVEN



Servomotore
(modulo del polso)

↓

Cavo tendineo
(trasmissione della forza)

↓

Guida lungo il dito
(instrada il cavo)

↓

Limitazione del movimento del dito
(vincolo attivo)

↓

Contatto con la superficie virtuale
(punto di feedback aptico

VALIDAZIONE DEL PROTOTIPO

Feedback aptico localizzato e risposta in tempo reale su indice e pollice

VALIDAZIONE

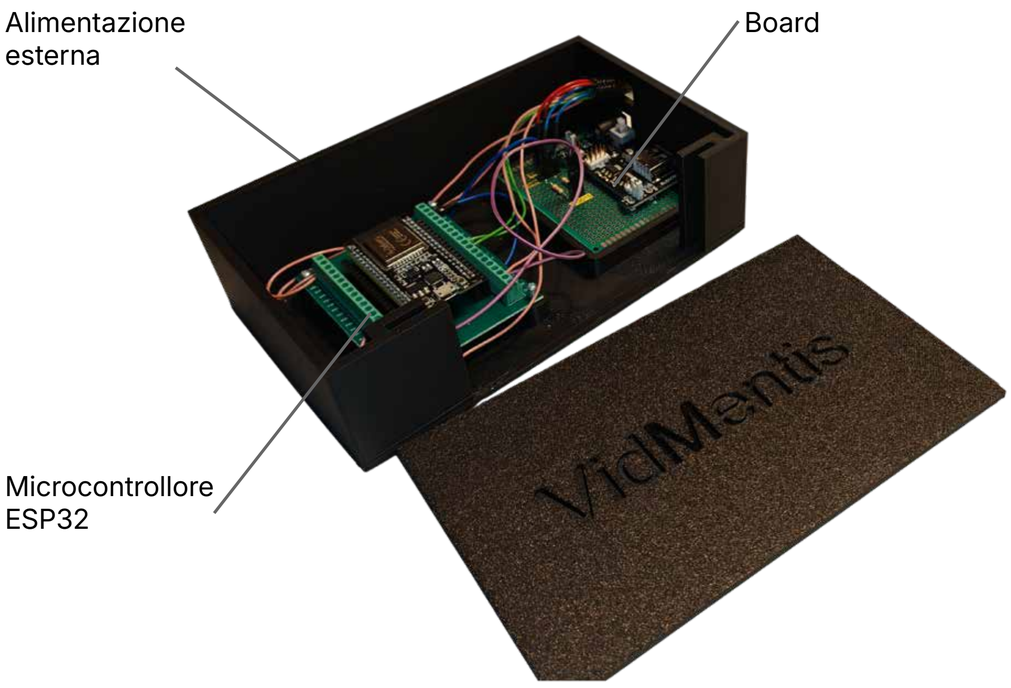
PROTOTIPO REALE SU POLLICE E INDICE

Dimostratore funzionale del sistema aptico su indice e pollice

- ESP32 montato e funzionante
- Tendon-driven attivo
- Feedback aprtico percepibile

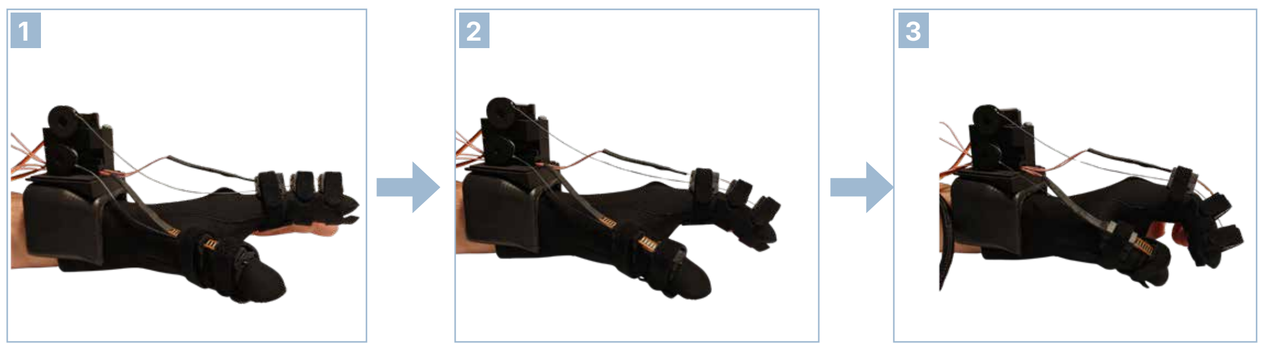
SETUP REALE

HARWARE IN USO



TEST FUNZIONALE

SEQUENZA DI ATTIVAZIONE



DITO A RIPOSO
Nessuna flessione, sistema inattivo

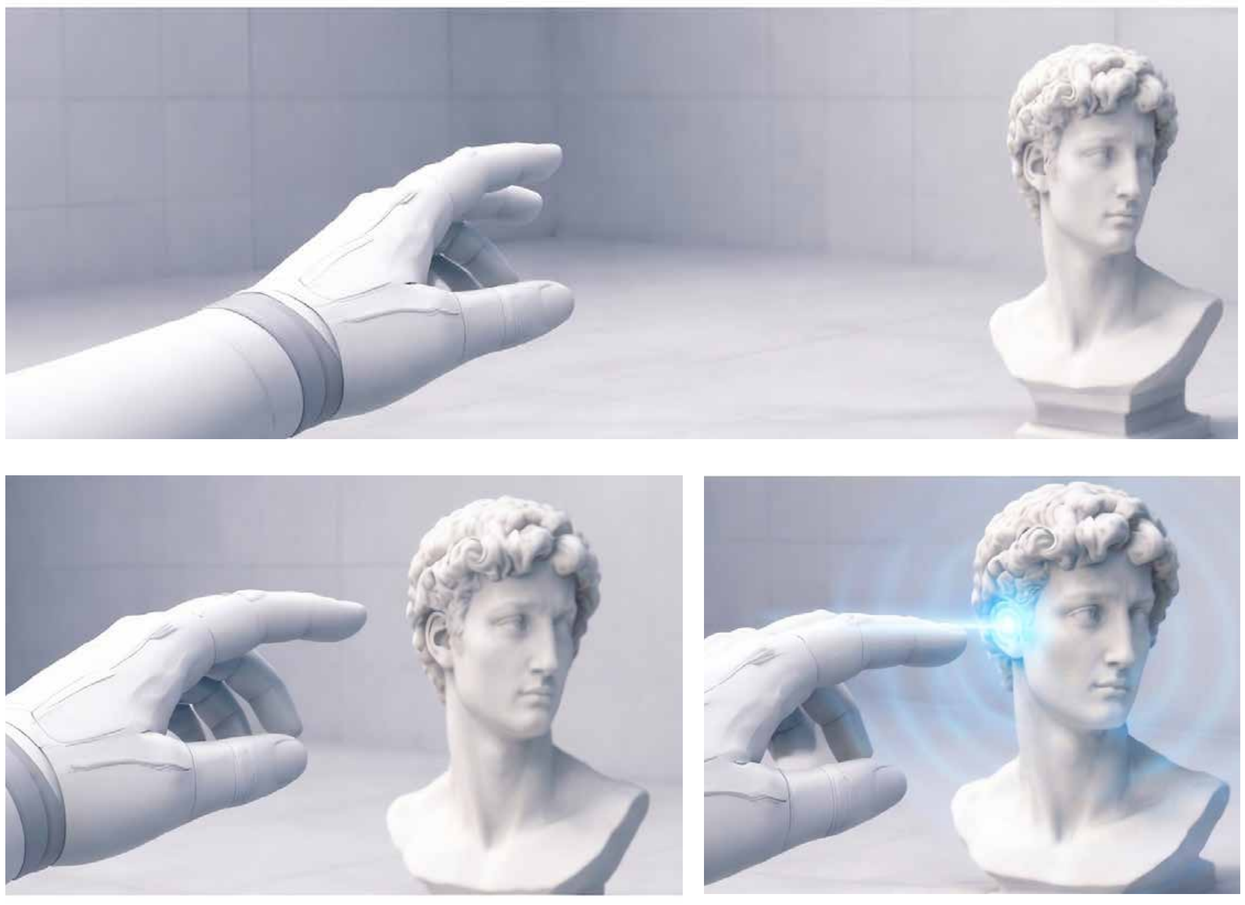
FLESSIONE RILEVATA
Il sensore di flessione rileva il movimento

FEEDBACK APTICO
Il servo si attiva e applica resistenza

Tempo di risposta: ~150 ms | Feedback locale e percepibile

INTEGRAZIONE DI UNITY

TEST IN AMBIENTE VIRTUALE



- Sincronizzazione corretta tra evento virtuale e feedback fisico

VALUTAZIONE DEL SISTEMA

RISULTATI OTTENUTI

- **Sistema funzionante in tempo reale**
  (Input → output ~ 150 ms)
- **Feedback aptico localizzato**
  Su pollice e indice
- **Prototipo dimostrativo affidabile**
  Fase embrionale

STATO DEL PROTOTIPO & SVILUPPI FUTURI

STATO ATTUALE	EVOLUZIONI DEL SISTEMA
→ Sistema funzionante su due dita (indice e pollice)	→ Estensione a configurazione multi-dito
→ Feedback aptico percepibile e risposta in tempo reale	→ Miniaturizzazione dell'elettronica (PCB dedicato)
→ Comunicazione stabile tra ambiente VR e sistema aptico	→ Integrazione feedback vibrotattile