



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UNA PIATTAFORMA DI REALTÀ MISTA PER L'APPRENDIMENTO MULTIMEDIALE INTERATTIVO TRAMITE GEMELLO DIGITALE

Tesi di laurea in Disegno Tecnico Industriale

Relatore

Prof.ssa Francesca De Crescenzo

Presentata da

Giacomo Siena

Sessione luglio 2024

Anno Accademico 2023/2024

Indice

1	INTRODUZIONE	1
2	DEFINIZIONI	4
2.1	REALTÀ AUMENTATA	4
2.2	REALTÀ MISTA	4
2.3	GEMELLO DIGITALE	5
2.4	MULTIMEDIALITÀ	5
2.5	INTERATTIVITÀ	6
3	ARCHITETTURA BASE DELLA PIATTAFORMA	7
4	ARCHITETTURA DEL CASO DI STUDIO	8
5	HARDWARE	12
6	SOFTWARE	18
6.1	LIBRERIA SIMPLEFOC	18
6.2	SCRIPT CONTROLLO DELLA COPPIA IN CATENA CHIUSA – ESP32	19
6.3	SCRIPT COMUNICAZIONE SERIALE E BLUETOOTH® LOW ENERGY – ARDUINO® NANO RP2040 CONNECT	20
6.4	APPLICAZIONE UNITY PER SISTEMA OPERATIVO ANDROID	21
7	CONCLUSIONI	23
8	BIBLIOGRAFIA	24

1 Introduzione

L'obiettivo del lavoro di tesi ha riguardato la progettazione e lo sviluppo di un prototipo di piattaforma di realtà mista per l'apprendimento multimediale interattivo sfruttando il concetto di gemello digitale.

Queste attività sono state il prosieguo di quanto svolto durante il tirocinio curriculare avente obiettivo lo *“Sviluppo di un'applicazione per sistema operativo Android da utilizzare su tablet che permetta la sovrapposizione di elementi virtuali interattivi su oggetto fisico quale prototipo realizzato tramite stampa 3D FDM (Fused Deposition Modeling)”*.

L'idea alla base dell'oggetto della tesi è scaturita da un'esigenza personale: durante il mio percorso universitario ho riscontrato alcune difficoltà nell'apprendere argomenti legati alla comprensione dell'architettura e del funzionamento di dispositivi ed organi meccanici attraverso i supporti didattici tradizionali, testuali o multimediali che siano.

Per quanto dei supporti video possano essere ben realizzati, l'impossibilità di interagirci sottrae un'importante componente propria dei meccanismi ed azionamenti, cioè il loro comportamento dipendente da una o più variabili esterne: variare una condizione a contorno può modificare il comportamento del meccanismo tanto da farlo funzionare in maniera totalmente differente se non addirittura contro-intuitiva.

L'utilizzo didattico di supporti puramente fisici, come meccanismi completi, presenta le seguenti problematiche:

- Ingombro e peso che rendono impraticabile il trasporto di tali meccanismi, anche in versione semplificata ed espositiva.
- Complessità data dalla necessità di avere componentistica accessoria alle parti essenziali che occlude o impedisce totalmente la visione delle parti di interesse.
- Alto costo e basso assortimento.

D'altra parte, la possibilità di interagire con un modello tridimensionale virtuale, eventualmente complesso, sovrapposto ad un modello fisico semplificato intorno al quale ci si può muovere liberamente con il proprio dispositivo mobile per visualizzarne da qualsivoglia angolazione il movimento, interagendo fisicamente con esso alterandone alcune variabili può essere il giusto compromesso tra l'approccio totalmente virtuale (animazione tridimensionale) e quello totalmente fisico.



Risultato finale del lavoro di tesi

L'elaborato si sviluppa nei successivi sei capitoli.

Nel capitolo 2 si introduce il lettore ai concetti ed alle definizioni delle tecnologie impiegate, chiarendo le parti dell'oggetto della tesi.

Nel capitolo 3 si definisce l'architettura base della piattaforma da progettare e sviluppare, definendo le sue componenti generiche.

Nel capitolo 4 si definisce l'architettura del caso di studio a partire dall'architettura base.

Nel capitolo 5 si descrive l'hardware scelto e utilizzato per creare il supporto fisico dell'architettura del caso di studio.

Nel capitolo 6 si descrivono le componenti software che si interfacciano con le varie componenti hardware per creare la catena chiusa in cui l'utente si inserirà per interagire con la piattaforma.

Infine, nel capitolo 7 si traggono alcune conclusioni sullo stato di sviluppo attuale della piattaforma.

2 Definizioni

2.1 Realtà aumentata

“Per realtà aumentata [...], o realtà mediata dall'elaboratore, si intende l'arricchimento della percezione sensoriale umana mediante informazioni, in genere manipolate e convogliate elettronicamente, che non sarebbero percepibili con i cinque sensi.

[...]

Gli elementi che «aumentano» la realtà possono essere aggiunti attraverso un dispositivo mobile, come uno smartphone, con l'uso di un PC dotato di webcam o altri sensori, con dispositivi di visione (per es. occhiali a proiezione sulla retina), di ascolto (auricolari) e di manipolazione (guanti) che aggiungono informazioni multimediali alla realtà già normalmente percepita.

Le informazioni «aggiuntive» possono in realtà consistere anche in una diminuzione della quantità di informazioni normalmente percepibili per via sensoriale, sempre al fine di presentare una situazione più chiara o più utile o più divertente.

[...]

La mediazione avviene solitamente in tempo reale. Le informazioni circa il mondo reale che circonda l'utente possono diventare interattive e manipolabili digitalmente.” (1)

2.2 Realtà mista

“Realtà mista, detta anche realtà ibrida, è la mescolanza dei mondi digitale e virtuale per produrre nuovi ambienti e visualizzazioni in cui oggetti virtuali e fisici coesistono ed interagiscono tra di loro in tempo reale. La realtà mista avviene non solo nel mondo fisico o in quello virtuale, ma è una vera e propria mescolanza di realtà fisica e virtuale. Nell'immaginario comune, è sovente menzionata come realtà virtuale, o VR, quando in realtà quest'ultima è solo una parte, un aspetto, della realtà mista.

La realtà mista è stata utilizzata in applicazioni in tutti i campi, tra cui progettazione, istruzione, intrattenimento, addestramento militare, assistenza sanitaria, gestione dei contenuti dei prodotti e funzionamento umano dei robot.” (2)

La realtà mista amplia il concetto di realtà aumentata in cui manca la componente di interazione in tempo reale.

2.3 Gemello digitale

“Un gemello digitale è la rappresentazione virtuale di un'entità fisica, vivente o non vivente, di una persona o di un sistema anche complesso connessa a una parte fisica e con la quale può scambiare dati e informazioni, sia in modalità sincrona (in tempo reale), che asincrona (in tempi successivi).

[...]

Il concetto di gemello digitale è stato coniato nel 2003 da Michael Grieves secondo il quale il gemello digitale corrisponde alla replica digitale di un qualsiasi prodotto fisico.

Esso è caratterizzato da tre parti:

- *Elemento fisico nello spazio reale.*
- *Elemento virtuale nello spazio virtuale.*
- *Dati e informazioni che forniscono le connessioni tra il sistema fisico e virtuale.*

È importante sottolineare la forte connessione tra il fisico e il virtuale: infatti, il gemello digitale non è semplicemente la copia del prodotto fisico (es. Modello 3D) ma è anche strettamente connesso a questo da specifiche relazioni.” (3)

2.4 Multimedialità

“La multimedialità è una forma di comunicazione caratterizzata dalla compresenza e interazione di più linguaggi (testi scritti, immagini, suoni, animazioni) in uno stesso supporto o contesto informativo.

[...]

Multimedialità e interattività

Talvolta la multimedialità viene erroneamente fatta coincidere con l'interattività. La confusione nasce dal fatto che spesso la multimedialità è affiancata dall'interattività: ad esempio, la citata enciclopedia multimediale sarà molto probabilmente anche interattiva, ovvero permetterà all'utente di interagire con essa (ovvero comunicare delle indicazioni al programma che gestisce l'enciclopedia, tramite il mouse o la tastiera, e ricevere da esso delle risposte sul monitor); in questo modo, l'utente potrà "dire" all'enciclopedia se di un certo lemma vuole la definizione testuale, oppure vuole vedere i filmati associati, o le foto, o ascoltare l'audio, ecc.

[...]

Multimedialità, insegnamento ed apprendimento

Sono ormai in molti a sostenere gli innumerevoli vantaggi che la multimedialità offrirebbe per favorire e migliorare l'apprendimento: i sistemi ipermediali sarebbero in grado di fornire rappresentazioni della conoscenza sfruttando differenti sistemi simbolici, permetterebbero di individuare e sviluppare prospettive di lavoro molteplici e diversificate, favorirebbero una migliore autoregolazione nell'apprendimento.” (4)

2.5 Interattività

“Nel campo dell'interazione uomo-macchina, quando l'utente trasmette un'informazione al sistema che sta utilizzando, l'interattività è la possibilità di:

- 1. ottenere un'azione dal dispositivo (feedback) in tempo reale;*
- 2. intervenire sul servizio che riceve a distanza (banche dati, telesorveglianza, ecc.).*

Esistono quindi due tipi di interazione possibile: 1) fra utente e apparecchio; 2) fra utente e fornitore del servizio.” (5)

3 Architettura base della piattaforma

Quel che si vuole creare è un'architettura così generalmente composta:

- Una parte fisica comprendente:
 - Un elemento fisso del meccanismo che funge da base e da obiettivo per il tracciamento nello spazio tridimensionale.
 - Un elemento mobile del meccanismo contenente sia un sensore che un attuatore in modo tale da poter trasferire informazioni in ingresso e in uscita.
 - Elettronica a corredo del sensore e dell'attuatore per permettere il loro corretto funzionamento e lo scambio di informazioni con la parte virtuale, attraverso il dispositivo mobile.
 - Un dispositivo mobile dotato di telecamera e display attraverso il quale visualizzare i contenuti di realtà mista ed interagire con il gemello digitale.
- Una parte virtuale, costituita da un'applicazione Android, che comprenda la possibilità di:
 - Agganciare virtualmente nello spazio un modello tridimensionale all'elemento fisico fisso.
 - Connettersi all'elettronica della parte fisica per permettere lo scambio di informazioni con essa.
 - Animare un modello tridimensionale in relazione ai dati del sensore posto nell'elemento fisico mobile.
 - Movimentare tramite interfaccia utente l'elemento virtuale e, di conseguenza, l'attuatore posto nell'elemento fisico mobile.

Questa architettura di base rientra nei concetti di realtà mista e gemello digitale in quanto elementi fisici e virtuali sono tra loro connessi, si scambiano informazioni in modalità sincrona e bidirezionale, e si muovono l'uno in relazione all'altro secondo relazioni specificate nel software.

4 Architettura del caso di studio

L'architettura oggetto del caso di studio è stata progettata e sviluppata per emulare meccanismi caratterizzati da un moto rotatorio intorno ad un asse di rotazione fisso, come rotismi (ordinari ed epicicloidali) e meccanismi per moto intermittente (intermittitori, arpionismi e ruote libere).

A tal proposito l'elemento fisico mobile dell'architettura base sarà qui una sorta di rotella, dotata di encoder rotativo per la lettura della posizione angolare e di un motore elettrico per la sua movimentazione artificiale, creando una catena chiusa: in questo modo, usando opportuna elettronica e software, è possibile non solo emulare l'evoluzione nel tempo del meccanismo a livello di movimentazione, ma anche trasmettere, tramite la rotella, la sensazione fisica tattile di cosa sta succedendo e cambiando, a livello di rotazione e coppia.

Per chiarezza è opportuno fare un esempio:

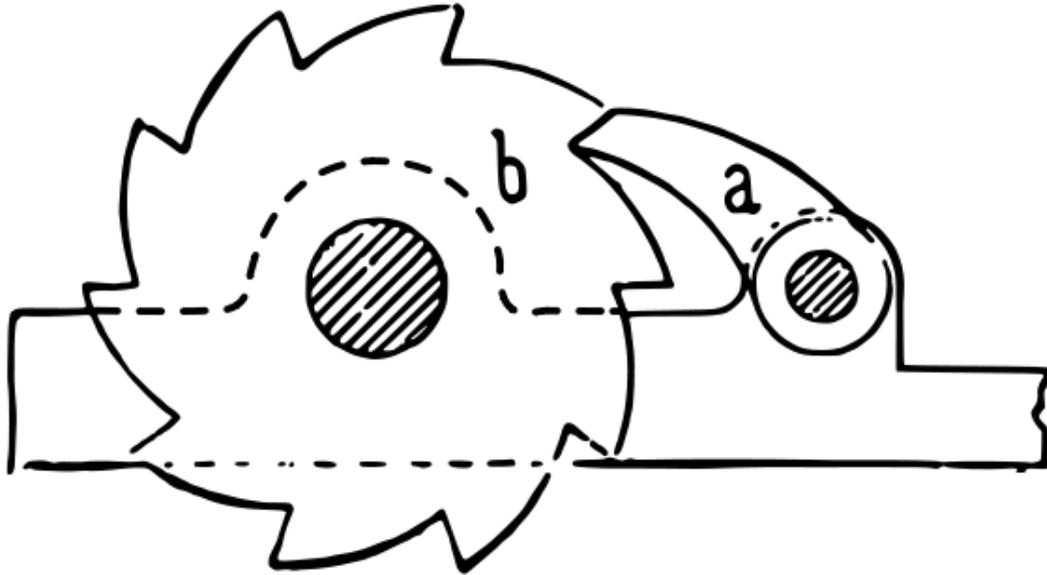
si immagini di dover emulare tramite l'architettura descritta un cricchetto (o cricco), ovvero *“un dispositivo meccanico costituito da una ruota dentata e un becco o dente complanare che consente il movimento in un solo senso, a meno di un certo gioco legato alla distanza fra i denti.*

I denti della ruota sono asimmetrici e angolati in modo che nella direzione di scorrimento ci sia poco attrito con il becco, e viceversa, nella direzione di blocco, il dente si accoppia con il becco per creare una superficie ampia di opposizione al movimento della ruota.

Il becco può ruotare su un perno, o essere costituito da materiale elastico.

[...]

Solitamente il becco striscia sulla ruota dentata grazie ad una forza elastica, che può essere esterna al becco (una molla) o intrinseca nella sua costruzione, come nel caso di una lamella di materiale elastico.” (6)



Schema di un cricchetto (8)

Per emulare tale meccanismo si avrà che:

- Il telaio del meccanismo virtuale si aggancerà virtualmente all'elemento fisico fisso.
- La ruota dentata "b" virtuale sarà virtualmente solidale alla rotella fisica.
- Il becco "a" virtuale si muoverà di conseguenza, coerentemente all'evoluzione del meccanismo.

Si potrà quindi movimentare la rotella fisica per far muovere la ruota dentata virtuale emulando il comportamento del meccanismo:

- In caso di rotazione antioraria si potrà creare una coppia oraria contrastante che aumenterà man mano che il becco "sale" sul dente della ruota dentata fino a crollare improvvisamente allo scatto del becco sul dente successivo.
- In caso di rotazione oraria si potrà creare una coppia antioraria contrastante di entità costante tale da segnalare all'utente che si sta movimentando l'intero meccanismo.

Si esclude la possibilità di impedire la movimentazione oraria della rotella (come accadrebbe se il telaio del meccanismo reale fosse fisso) poiché richiederebbe l'applicazione di una coppia antioraria contrastante proporzionale alla coppia oraria data dall'utente che può superare facilmente i limiti del motore elettrico attuatore che verrà utilizzato.

L'architettura così fatta potrebbe emulare a pieno il funzionamento del meccanismo comunemente utilizzato nella ruota posteriore di una bicicletta, detto ruota libera.

Immaginando di essere fermi su una bicicletta, se si pedalasse "all'indietro" si sentirebbero i becchi della ruota libera scattare sulla ruota dentata, permettendo di pedalare senza movimentare la bicicletta.

Se si pedalasse "normalmente" in avanti, i becchi andrebbero subito in battuta ingaggiando con la ruota dentata, trascinandola, e riuscendo a trasferire il moto dei pedali alla ruota posteriore, avviando la bicicletta.

Ora, la difficoltà di comprendere a pieno un meccanismo del genere nasce dal fatto che si possono ricreare le situazioni appena descritte invertendo l'organo meccanico che da coppia in ingresso e l'organo meccanico resistente, da movimentare.

Infatti, supponendo di essere in corsa sulla bicicletta la ruota posteriore ruoterà ad una certa velocità;

tenendo fermi i pedali entrerebbe in azione la ruota libera, permettendo alla ruota posteriore di muoversi liberamente: si sentirebbero i becchi scattare in continuazione sulla ruota dentata.

Se nella medesima condizione si pedalasse "all'indietro" la frequenza degli scatti dei becchi aumenterebbe notevolmente.

Se invece si lasciassero andare i pedali, a causa della presenza di elementi elastici a movimentazione dei becchi, i pedali verrebbero trascinati dalla ruota posteriore (a mezzo della catena di trasmissione);

si precisa che, se il meccanismo fosse ideale/perfetto, questo non succederebbe.

Se si pedalasse normalmente, con una velocità di rotazione tale da superare la velocità di rotazione della ruota posteriore (considerando il rapporto di trasmissione), si trascinerebbe la ruota posteriore, accelerando la bici.

Ulteriore situazione si avrebbe se supponessimo di voler provare, da fermi, ad arretrare con la bici; infatti, scopriremmo ben presto di non riuscirci a meno di non lasciare i pedali liberi di ruotare o di accompagnare il movimento dei pedali (all'indietro) durante il moto: in questo caso è la ruota posteriore che, attraverso la ruota libera, trascina i pedali.

Questo utilizzo molto comune di un cricchetto è un esempio perfetto di come un meccanismo apparentemente semplice, posto su un veicolo che quasi tutti abbiamo imparato ad utilizzare, possa funzionare in una maniera piuttosto che in un'altra a seconda delle condizioni al contorno, rendendone difficile la spiegazione e conseguente comprensione a mezzo testuale, verbale ma anche video.

5 Hardware

Per realizzare la catena chiusa dell'architettura del caso di studio, la scelta dell'hardware è stata guidata dalla compatibilità con la libreria software open-source SimpleFOC (7) che verrà descritta nel prossimo capitolo.

A tal proposito, la scelta del motore elettrico attuatore è ricaduta su un motore brushless trifase tipicamente utilizzato nei meccanismi di stabilizzazione di videocamere compatte (action-camera), identificato dalla sigla 2804, avente come caratteristiche:

- Tensione di alimentazione nominale 12V DC.
- Corrente massima consigliata 180 mA.
- Costante di velocità 320 KV.
- 7 coppie polari.

Questo modello non offre alte prestazioni in termini di coppia ma offre una movimentazione piuttosto scorrevole ad un costo estremamente contenuto.

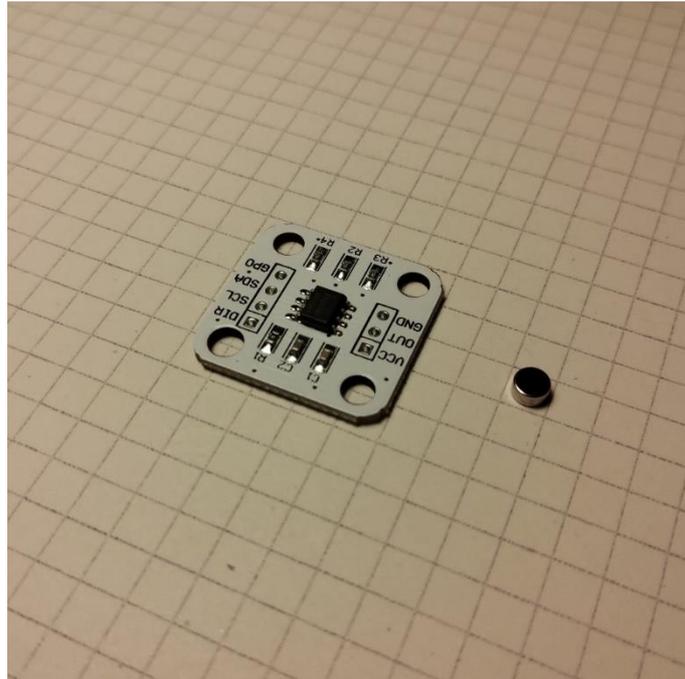


Motore brushless DC 2804 utilizzato come attuatore

Di seguito verrà fatto riferimento ad esso con motore BLDC (acronimo di BrushLess Direct Current).

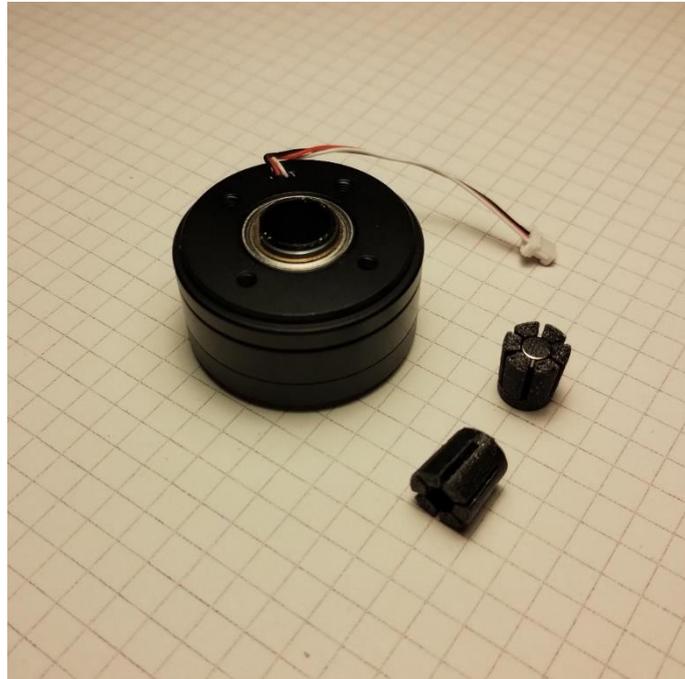
Come encoder rotativo è stato scelto un AMS AS5600, encoder rotativo magnetico con risoluzione a 12 bit: questo sensore è facilmente reperibile ed estremamente economico il che purtroppo si riflette in una scarsa stabilità del segnale che necessiterà di essere corretta via software.

L'encoder rotativo magnetico capta l'orientazione del campo magnetico di un apposito magnete, con magnetizzazione radiale, solidamente connesso al motore BLDC.



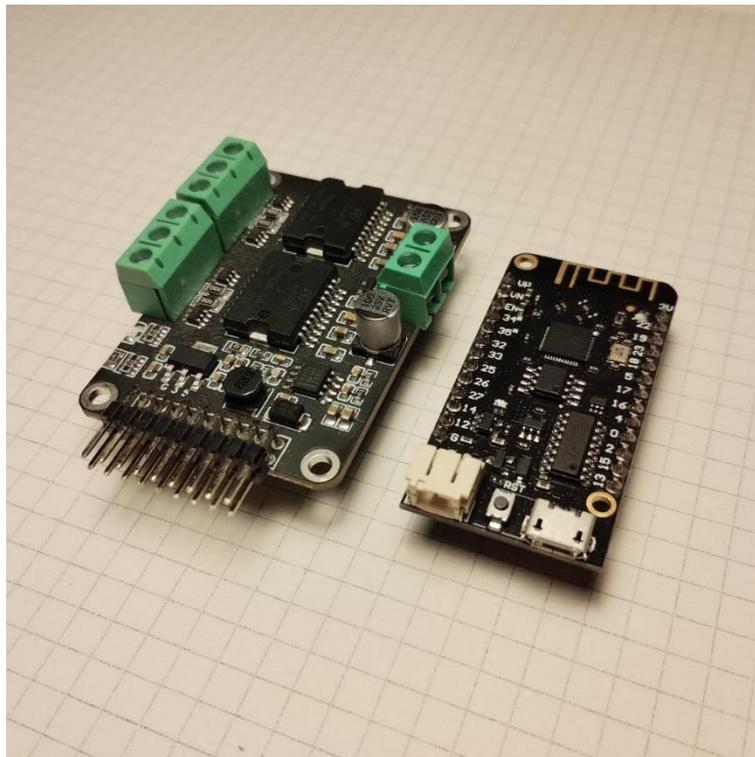
*Sulla sinistra, scheda elettronica con AMS AS5600;
sulla destra, magnete con magnetizzazione radiale*

Per fissare il magnete al motore BLDC è stato modellato e stampato in 3D un supporto simile ad una pinza elastica utilizzata per afferrare elementi assialsimmetrici, sfruttando la presenza del foro centrale passante nel rotore del motore BLDC solitamente utilizzato per far passare cavi.



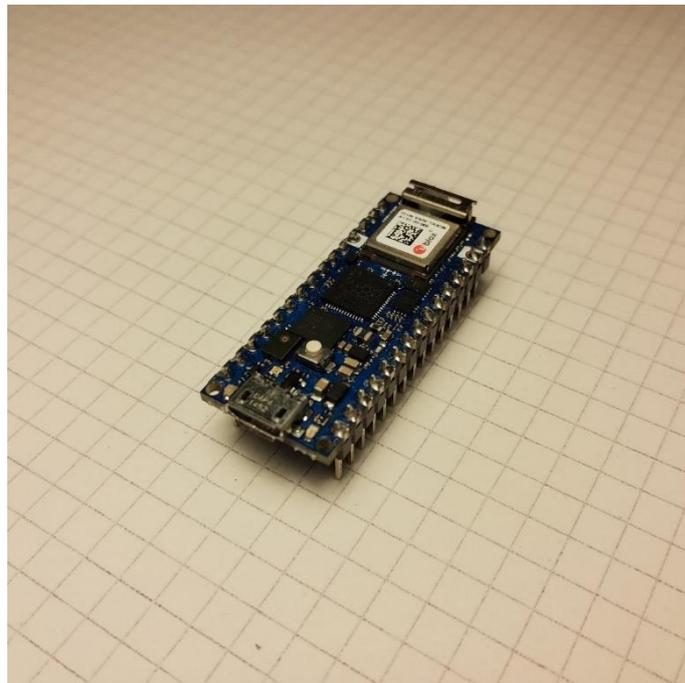
Sulla destra, esempi del supporto stampato in 3D per fissare il magnete al motore BLDC (sulla sinistra)

Per gestire elettricamente il motore brushless trifase è necessaria dell'elettronica di potenza apposita, comunemente chiamata driver: è stata utilizzata una Makerbase DUAL FOC V3.1 compatibile direttamente con microcontrollore basato su Espressif ESP32 che eseguirà il codice di controllo in catena chiusa del sistema.



*Sulla sinistra, scheda Makerbase DUAL FOC V3.1;
sulla destra, scheda ESP32 WeMos LOLIN32 Lite*

Dovendo comunicare con il dispositivo mobile dell'utente, smartphone o tablet che sia, è stato scelto di utilizzare il protocollo di comunicazione Bluetooth® Low Energy per ragioni che verranno motivate nel prossimo capitolo: qui ci interessa sapere che, per utilizzare tale tecnologia, è stato utilizzato un microcontrollore Arduino® Nano RP2040 Connect.

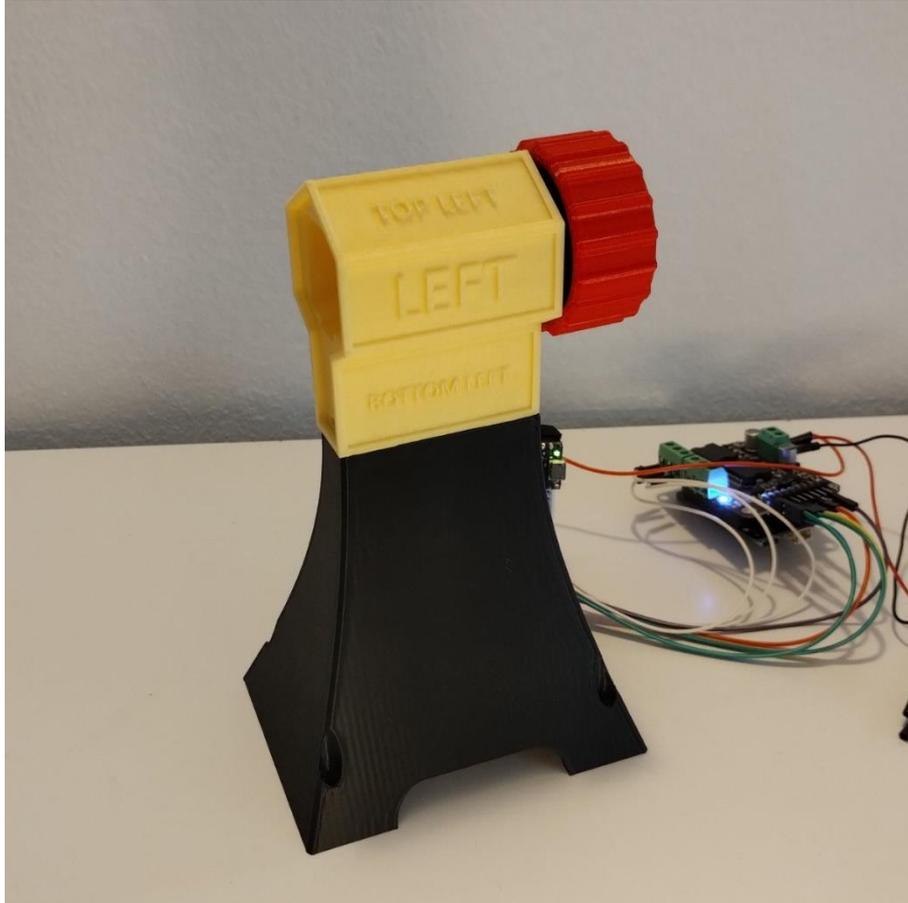


Scheda Arduino® Nano RP2040 Connect

La necessità di utilizzare due microcontrollori separati è dettata dalla frequenza di esecuzione del codice di controllo in catena chiusa che deve essere il più alta possibile e svincolata da interruzioni esterne, pena l'irregolarità nel moto del sistema.

I due microcontrollori saranno collegati tra loro utilizzando l'interfaccia seriale bidirezionale presente su entrambi, attraverso due singoli cavi.

Il resto dell'hardware, escludendo cavetteria e alimentatore DC da 12V, è costituito da pezzi stampati in 3D con tecnologia FDM.



Parte hardware del sistema completo

Il particolare più importante è il componente in giallo che sarà utilizzato come obiettivo per il riconoscimento del sistema nello spazio tramite l'applicazione di realtà aumentata: esso è stato realizzato cercando di avere geometrie definite e sufficienti particolari da rendere non ambigua l'orientazione del componente nello spazio.

La rotella in rosso contiene al suo interno il motore BLDC che è a sua volta adiacente all'AS5600, quest'ultimo fissato nel componente giallo.

6 Software

6.1 Libreria SimpleFOC

La libreria SimpleFOC (7) fa parte del SimpleFOCproject ovvero un'iniziativa open source guidata dalla comunità con l'obiettivo di demistificare il Field Oriented Control (FOC) per un controllo dei motori elettrici di facile utilizzo. Il progetto mira a fornire soluzioni ben documentate, modulari e multiplatforma sia a livello software che hardware.

Il Field Oriented Control, chiamato anche Vector control, è un metodo di controllo a frequenza variabile di motori elettrici trifase a corrente alternata o brushless a corrente continua utilizzato per ottenere:

- Controllo preciso su tutta la gamma di velocità di rotazione.
- Massima coppia a velocità di rotazione nulla.
- Alte prestazioni dinamiche in accelerazione e decelerazione.
- Ottima efficienza energetica.

L'interesse qui è rivolto alla possibilità di generare una coppia precisa e relativamente elevata sin da velocità di rotazione nulla.

6.2 Script controllo della coppia in catena chiusa – ESP32

La base del codice in esecuzione su ESP32 è quella che viene descritta dalla libreria SimpleFOC come controllo della coppia in catena chiusa.

Le componenti principali dello script sono:

- Dichiarazione dell'hardware utilizzato ovvero encoder magnetico, motore BLDC e driver.
- Inizializzazione della logica di controllo, verificando la coerenza dei dati dichiarati con l'effettivo comportamento dell'hardware.
- Funzioni di comunicazione in ingresso e uscita.
- Logica di controllo che andrà a simulare il comportamento del meccanismo obiettivo.

Le prime due componenti sono critiche per avere un solido funzionamento di base: la difficoltà è data dal trovare la configurazione software giusta per ottenere un controllo in catena chiusa relativamente preciso, ripetibile e adatto allo scopo.

Ogni combinazione di hardware utilizzato necessita della propria configurazione ma in linea di massima un hardware più affidabile, soprattutto riferendosi al sensore di rotazione, garantirebbe una configurazione più semplice.

Non a caso l'AMS AS5600 è sconsigliato a favore del leggermente più costoso ma di gran lunga più affidabile AMS AS5048A: proprio per sopperire al segnale instabile dell'AS5600 è stato necessario effettuare sotto-campionamento, mediando i valori rilevati nel tempo.

6.3 Script comunicazione seriale e Bluetooth® Low Energy – Arduino® Nano RP2040 Connect

Per far comunicare bidirezionalmente il dispositivo mobile con il sistema descritto finora si utilizza un ulteriore microcontrollore, un Arduino® Nano RP2040 Connect, che farà puramente da tramite.

Esso comunicherà da una parte con l'ESP32, tramite interfaccia seriale con due cavi, scambiando:

- I dati relativi a posizione angolare e velocità angolare da ESP32 ad Arduino.
- I comandi utente da Arduino ad ESP32.

D'altra parte, l'Arduino comunicherà con il dispositivo mobile tramite protocollo di comunicazione Bluetooth® Low Energy, in particolare utilizzando il modello software GATT (Generic ATtribute profile).

Il GATT, tradotto in profilo di attributo generico, è formato virtualmente da:

- Un *dispositivo periferico* che mette a disposizione un *servizio* composto da una o più *caratteristiche* che rappresentano ognuna un dato; nel nostro caso si avrà una caratteristica di input, una di output e altre caratteristiche ad hoc per i dati di posizione angolare e velocità angolare del motore BLDC.
- Un *dispositivo centrale* che si connette al dispositivo periferico ed effettua richieste di lettura sulle caratteristiche o si sottoscrive a queste, ricevendo una notifica ogni qual volta il valore associato alla caratteristica cambi; per caratteristiche predisposte, il dispositivo centrale può sovrascrivere il valore della caratteristica.

6.4 Applicazione Unity per sistema operativo Android

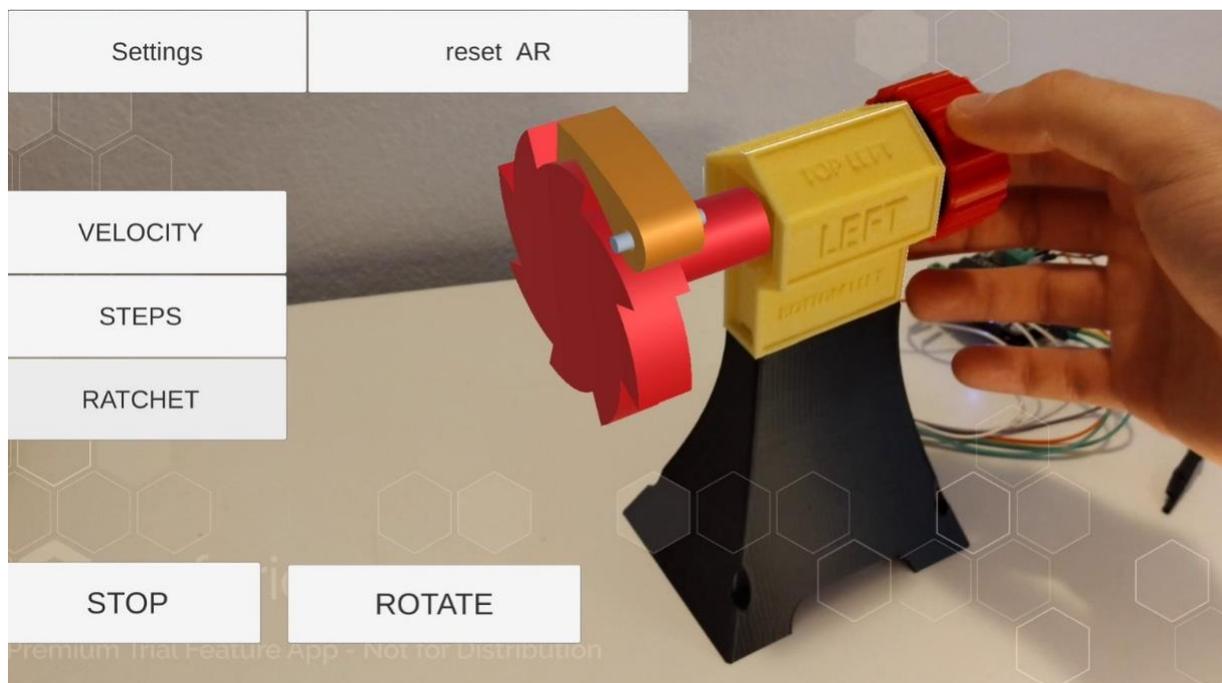
Come ambiente di sviluppo per l'applicazione mobile è stato scelto Unity, motore grafico e fisico multiplatforma che consente lo sviluppo di contenuti interattivi 2D e 3D.

Per permettere il riconoscimento di oggetti fisici nello spazio attraverso la fotocamera del dispositivo è stato utilizzando il kit di sviluppo PTC Vuforia per Unity.

Vuforia mette a disposizione risorse per la realtà aumentata utilizzabili direttamente in Unity, configurabili con relativa semplicità a seconda delle proprie esigenze, senza dover avere conoscenze specifiche ed approfondite dei vari aspetti di cui sono composte.

Si specifica che Vuforia necessita di fare apprendimento sul modello obiettivo da riconoscere, attraverso il software Model Target Generator che elabora in cloud i dati, impiegando anche diverse ore, generando poi un pacchetto da utilizzare in Unity.

L'applicazione sviluppata presenta una interfaccia utente essenziale con un menù delle impostazioni, per gestire la connessione Bluetooth con il sistema e per modificare alcune impostazioni del sistema, e con alcuni comandi che dipendono dal contesto di utilizzo.

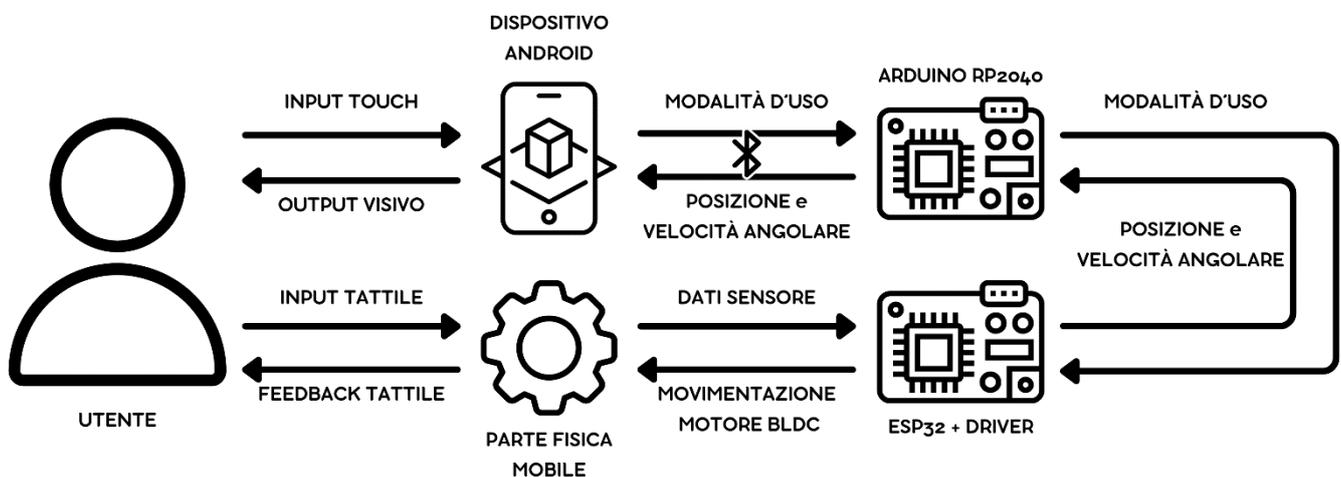


Cattura schermo da smartphone durante l'utilizzo dell'applicazione sviluppata

Le modalità di utilizzo sono 3:

- Velocity, che permette un semplice controllo della velocità di rotazione del meccanismo.
- Steps, che simula un meccanismo rotante con un numero selezionabile di posizioni fisse.
- Ratchet, che simula il meccanismo dell'architettura del caso di studio descritta in precedenza.

Per ciascuna modalità è presente la controparte software integrata nell'ESP32 che andrà a simulare a livello fisico, invece che virtuale, il sistema.



Schema logico delle componenti dell'architettura e del flusso di informazioni

7 Conclusioni

Allo stato attuale di sviluppo della piattaforma, l'architettura del caso di studio può essere simulata a pieno con un grado soddisfacente di coerenza visiva-tattile: purtroppo, essendo un sistema che si propone di andare a compensare le lacune del supporto puramente visivo, è difficile descriverne qui, a mezzo testuale, il comportamento e le sensazioni restituite dal sistema.

Un'evidenza del buon funzionamento del sistema si ha quando, durante il suo utilizzo, si va a disattivare totalmente il feedback tattile: si ha subito una sensazione di vuoto sensoriale, di incoerenza tra quello che ci aspettiamo che succeda e tra quello che effettivamente sentiamo, segno che il comportamento del sistema era stato associato ad un funzionamento quasi normale, tendente alla realtà a cui i nostri sensi sono abituati.

Per arrivare ad un grado di realismo del feedback tattile accettabile è stato necessario effettuare una messa a punto di vari parametri e utilizzare qualche accorgimento per aiutare a trasmettere le sensazioni tattili giuste.

A titolo di esempio si ha che, quando il becco del cricco del meccanismo virtuale effettua uno scatto sulla ruota dentata, oltre a far crollare di colpo la coppia resistente del motore BLDC si va ad invertire il verso della coppia resistente stessa per poco più di qualche millisecondo, per poi invertirla nuovamente per lo stesso lasso di tempo: in questa maniera si genera uno scatto più deciso, ben riconoscibile sia a livello tattile che uditivo.

In generale la complessità di una piattaforma simile è data dall'integrazione di più componenti hardware e software, ognuna delle quali ha avuto le sue difficoltà intrinseche nell'essere sviluppata separatamente, per poi inevitabilmente dover essere revisionata e modificata durante l'integrazione.

A tal proposito è stato essenziale aver dedicato abbastanza tempo per lo studio, l'analisi e lo sviluppo di ogni parte separata del sistema, lavoro svolto in parte durante il tirocinio curriculare, in parte nel mio tempo libero ed in parte durante il tirocinio in preparazione per la tesi.

8 Bibliografia

1. **Wikipedia, L'enciclopedia libera.** Realtà aumentata. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 12 giugno 2024. https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Realt%C3%A0_aumentata&oldid=139727481.
2. —. Realtà mista. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 26 dicembre 2023. https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Realt%C3%A0_mista&oldid=137047347.
3. —. Gemello digitale. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 20 settembre 2023. https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Gemello_digitale&oldid=135580507.
4. —. Multimedialità. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 2 dicembre 2023. <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Multimedialit%C3%A0&oldid=136695016>.
5. —. Interattività. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 16 settembre 2023. <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Interattivit%C3%A0&oldid=135498940>.
6. —. Cricco. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 30 maggio 2023. <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Cricco&oldid=133735625>.
7. **A. Skuric, H. S. Bank, R. Unger, O. Williams, D. González-Reyes.** SimpleFOC: A Field Oriented Control (FOC) Library for Controlling Brushless Direct Current (BLDC) and Stepper Motor. *The Journal of Open Source Software*. [Online] 2022. <https://doi.org/10.21105/joss.04232>.
8. **Wiora, Georg.** File:Sperrklinke Schema.svg. *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online] 23 ottobre 2005. https://it.wikipedia.org/wiki/File:Sperrklinke_Schema.svg.