

Disseny i desenvolupament d'un prototip de guants intel·ligents per a la captura de gests en llenguatge de signes

Robert José Pearson Ruiz

28 de juny de 2025

Resum– La comunicació entre persones sordes i oients es veu dificultada per la dependència d'intèrprets especialitzats i la manca de solucions accessibles. Per superar aquesta barrera, aquest projecte proposa el disseny d'un prototip de guants intel·ligents capaços de capturar els gestos de la llengua de signes per poder traduir-los a veu en temps real.

L'objectiu d'aquest projecte és únicament representar el moviment capturat pels guants en temps real mitjançant un model 3D i enviar les posicions i rotacions en l'espai de les mans virtuals a un sistema de traducció a veu. La implementació d'aquest sistema de traducció no forma part d'aquest projecte.

Paraules clau– Persones sordes, Comunicació accessible, Llengua de signes, Guants intel·ligents, Captura de gestos, Representació 3D, Traducció a veu

Abstract– Communication between deaf and hearing individuals is hindered by the reliance on specialized interpreters and the lack of accessible solutions. To overcome this barrier, this project proposes the design of a prototype of smart gloves capable of capturing sign language gestures in order to translate them into speech in real time.

The objective of this project is solely to represent the movement captured by the gloves in real time through a 3D model and to send the positions and rotations of the virtual hands in space to a speech translation system. The implementation of this translation system is not part of this project.

Keywords– Deaf people, Accessible communication, Sign language, Smart gloves, Gesture capture, 3D representation, Voice translation

1 INTRODUCCIÓ - CONTEXT DEL TREBALL

ACTUALMENT, les persones sordes necessiten l'ajut d'un intèrpret professional per tal de fer-se entendre en el seu dia a dia. Aquest fet dificulta en gran manera la comunicació i l'autonomia d'aquestes persones. Malauradament, encara no existeix una alternativa realment funcional que posi solució a aquest problema.

En el mercat trobem productes com per exemple Sign4all [1], que tracten de fer-ho mitjançant visió per computador. Encara que en un primer pensament pugui semblar correcte,

- E-mail de contacte: robs2663@gmail.com
- Menció realizada: Computació
- Treball tutoritzat per: Daniel Soto Álvarez (Departament de Ciències de la Computació)
- Curs 2024/25

aquests productes comporten diversos inconvenients. Alguns d'aquests impliquen problemes de privacitat d'imatge, dependència de condicions lumíniques, problemes d'angles morts, entre d'altres. A més, obliguen a les persones no signants a participar en la gravació de la persona sorda, generant de nou una dependència externa.

És per aquest motiu que s'ha cercat una forma de neutralitzar aquests desavantatges.

La idea tracta de realitzar la traducció directament des de les mans que realitzen els signes. Aquesta solució consisteix en uns guants que, mitjançant diversos sensors, siguin capaços de capturar la posició en l'espai de les mans i dits en temps real. Fent la captura d'aquesta forma, eliminem tots els inconvenients esmentats i donem a les persones sordes un nivell d'autonomia molt superior. Augmentant així la seva inclusió en la societat.

Combinant les dades extretes amb aquests sensors, amb un model de machine learning es podria traduir la llengua

de signes a veu en temps real sense haver d'involucrar altres persones.

Donat que la càrrega del projecte sencer és massa gran per a un únic treball de fi de grau (TFG), s'ha dividit el projecte en dos. De tal manera que aquest treball se centra únicament en el disseny i construcció dels guants intel·ligents i l'extracció de les dades corresponents. La part del desenvolupament d'un sistema de traducció d'aquestes dades a veu mitjançant intel·ligència artificial és realitzada pel company Sergio López Parejo en un TFG a part.

2 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest projecte és realitzar el disseny i desenvolupament d'un prototip format per dos guants intel·ligents, que permetin capturar en temps real el moviment de les mans. Per tal de comprovar que el moviment es capture correctament, faré servir un entorn 3D en el qual es pugui visualitzar la translació del moviment de les mans a un model 3D en temps real.

Aquest model 3D exportarà simultàniament la posició de les mans virtuals a un altre sistema, el qual traduirà el llenguatge de signes a veu. Aquest altre sistema no en forma part d'aquest TFG.

Per poder completar això, el projecte s'ha dividit en els següents objectius.

2.1 Disseny i construcció del prototip

Dissenyar i construir un prototip funcional format per dos guants intel·ligents que integrin de manera ergonòmica el microcontrolador i els diversos sensors necessaris. Addicionalment, el prototip haurà de tenir una correcta connexió elèctrica i una mobilitat còmoda de la mà de l'usuari per a la captura fiable del moviment.

2.2 Crear o adaptar un model 3D de mà

Construir o adaptar un model 3D de mà amb un rigg [13] complet (oscos, articulacions i pesos) que permeti traduir fidelment els angles de flexió i rotació mesurats pels sensors a deformacions realistes de la mà.

2.3 Garantir una bona transmissió de dades

Optimitzar la transmissió de dades via Bluetooth clàssic amb una velocitat suficient per assolir almenys 60 missatges (frames) per segon, incloent-hi mecanismes de detecció i correcció d'errors per minimitzar la pèrdua de paquets i la latència.

2.4 Extreure dades de l'escena 3D

Implementar un script en Unity que reculli en temps real les coordenades i orientacions de cada articulació del rigg, empaqueti aquesta informació en un format estructurat, i la prepari per enviar al mòdul d'intel·ligència artificial encarregat de la traducció a veu.

2.5 Elements del projecte

A continuació es mostra un diagrama en el qual es veu la connexió entre els diferents elements del projecte. La secció delimitada en verd engloba els passos realitzats en aquest treball, excloent el sistema de traducció a veu.

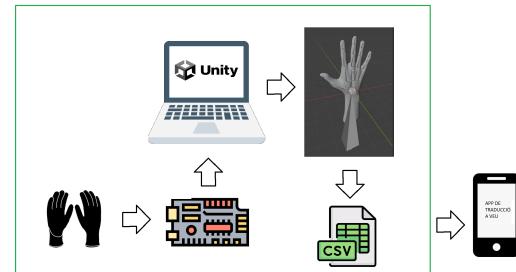


Fig. 1: Connexió dels elements del projecte

3 ESTAT DE L'ART

En fer una investigació sobre les tecnologies de captura de moviment més utilitzades en l'actualitat, m'he trobat que els sistemes han anat evolucionant naturalment en direcció a l'ús de visió per computador. Cada cop es veuen més dispositius i programes que usen aquestes tecnologies.

Així i tot, també m'he trobat diversos productes, no comercialitzats, de persones que en l'última dècada, han intentat realitzar un producte similar al que es planteja en aquest projecte.

En conjunt tant d'aquests productes, com dels sistemes de captura de moviment més rellevants, he pogut trobar diversos projectes que m'han servit com a referència.

Aquells que més m'han servit com a referència han sigut els següents.

3.1 Ultraleap (Leap Motion Controller)

La plataforma Ultraleap [2] combina dues càmeres estèreo d'infraroig i diversos LEDs per il·luminar la zona de treball, juntament amb un programari avançat que reconstrueix la geometria interna de la mà en temps real.

3.2 Monocular RGB 3D Hand Pose

El mètode *Monocular RGB 3D Hand Pose* [3] permet estimar la postura de la mà en 3D utilitzant només una càmera RGB convencional. El procés consisteix en:

1. Detectar la mà i localitzar punts clau en 2D mitjançant xarxes neuronals.
2. Ajustar un model d'esquelet 3D que minimitza l'error respecte a les coordenades 2D prèviament detectades.

3.3 Productes similars

Diversos projectes han explorat la traducció de llengua de signes a veu. Els més rellevants per aquest projecte han estat els següents:

- **Sign4ALL:** Aplicació basada en visió per computador que transforma un vídeo de una persona signant a text i/o veu.

- **Sign-IO:** [4] Guants equipats amb sensors que transmeten per Bluetooth les dades a un dispositiu mòbil on una aplicació converteix els gestos en veu audible.
- **Sign-to-speech:** [5] Prototips emergents que ofereixen traducció en temps real de gestos a àudio, encara en fase pilot.
- **CoMotion:** [6] Projecte de dos estudiants de la universitat de Washington que consisteix en la construcció de guants per traduir la llengua de signes a text o veu.

Després d'una investigació de cadascun d'aquests, s'ha pogut valorar la seva viabilitat tècnica, precisió i facilitat d'integració. En general, tots ofereixen resultats positius en entorns controlats, amb nivells de precisió elevats, confirmant la validesa de l'enfocament escollit en aquest projecte.

4 METODOLOGIA

Per desenvolupar aquest projecte, s'ha seguit un procediment estructurat en quatre fases principals.

4.1 Hardware

El primer pas per poder dur a terme la construcció del prototip ha estat la selecció dels components electrònics.

Entre aquests, són necessaris per a cada guant un microcontrolador per fer el processament de les dades dels sensors, una unitat de moviment inercial (IMU) per detectar la rotació i el moviment de la mà, sensors de força resistiva flexibles per calcular la flexió dels dits i un mòdul Bluetooth per enviar les dades.

En un inici, donat que els dos guants funcionarien exactament igual, s'ha decidit construir un únic guant per reduir el cost i el temps de realització del projecte. En cas que fos possible tant econòmicament com en termes de temps, es construiria el segon.

4.1.1 Microcontrolador

Pel que fa als microcontroladors, hi ha moltes opcions possibles al mercat. Els principals o més rellevants poden ser de les marques Arduino i Raspberry Pi, entre altres.

En aquest projecte, s'ha decidit utilitzar un microcontrolador Arduino per dos motius principals. Primerament, perquè ja estic familiaritzat amb el funcionament d'aquests microcontroladors i, per tant, el desenvolupament serà més eficient. I addicionalment, hi ha diversos models que incorporen sensors IMU integrats, per la qual cosa permeten fer ús d'aquest sensor sense haver de comprar-ne un a part. Reduint així el cost de cada guant en aproximadament deu euros.

Dintre dels microcontroladors Arduino amb sensors IMU integrats, hi ha diverses opcions. D'aquestes, interessa agafar un de la família Nano, els quals tenen unes dimensions reduïdes, mantenint un processament suficient per a la realització del projecte.

En un principi es va cercar una opció que tingués un mòdul Bluetooth convencional integrat per poderaprofitar-ho i no haver de comprar un mòdul a part. Això únicament

deixa dues opcions, Arduino Nano RP2040 Connect i Arduino Nano 33 IoT.

Finalment, es va optar per la segona opció, ja que el cervell de la primera placa, tot i ser Arduino, treballa amb una Raspberry Pi, podent complicar l'ús del mateix sense aportar cap avantatge a l'opció escollida, Arduino Nano 33 IoT. [8]

Les especificacions més importants d'aquest microcontrolador són les següents:

DIMENSIONS: 45 mm x 18 mm

PES: 5 g

PROCESSADOR: SAMD21G18A 48MHz

MEMÒRIA: 256 KB SRAM, 1 MB flash

COMUNICACIÓ: UART, I2C i SPI

PREU: 28,80 €

4.1.2 Sensors de força resistiva

Respecte als sensors per calcular la flexió dels dits, i després d'haver realitzat una investigació per determinar els mètodes més utilitzats, s'ha arribat a la conclusió que la millor opció és utilitzar sensors de força resistiva flexibles [9]. Aquests sensors funcionen de tal manera que detecten la resistència que es troben els electrons. És a dir, en flexionar el sensor, la resistència elèctrica detectada augmenta, i en tornar a deixar-ho en repòs aquesta disminueix. D'aquesta manera es pot detectar quan un dels dits es flexiona.

Per escollir entre les opcions disponibles de sensors d'aquest tipus, els factors més rellevants han estat la longitud i el preu.

És important que el sensor sigui prou llarg per cobrir com a mínim les dues falanges més importants (proximal i medial), ja que és on es produeix la major part de la flexió.

Un altre factor seria el rang de força que són capaços de mesurar. No obstant això, totes les opcions que s'han trobat per un preu assequible tenen el mateix rang, o molt similar.

Finalment, els sensors que s'han comprat tenen les següents especificacions tècniques:

DIMENSIONS: 110 mm x 10 mm x 25 mm

PES: 1.5 g

RANG: 0-500 g

VOLTATGE: 3.3 V

TEMPS DE RESPUESTA: Menys de 10 ms

PREU: 1 €

4.1.3 IMU

En el cas de l'IMU, el que s'ha fet servir és el que hi ha integrat a la placa Arduino. En aquest cas, el model ha estat el LSM6DS3 [10].

Aquest IMU consta de sis eixos, tres d'ells dedicats a les dades d'acceleració, i els altres tres dedicats a les dades del giroscopi.

Són tres eixos de cada tipus per poder descriure aquestes dades en tres dimensions, per tant, es fa la lectura per a cada eix x, y i z.

Les especificacions tècniques d'aquest IMU són les següents:

DIMENSIONS: 2.5 mm x 3 mm x 0.83 mm

PES: Menys d'1 g

PRECISIÓ ACCELERÒMETR: 0.061-0.488 mg/LSB

PRECISIÓ GIROSCOPI: 4.375-70 mdps/LSB

CONSUM: 0.9–1.25 mA (mod normal i d'alt rendiment)

VOLTATGE D'OPERACIÓ: 1.71 V – 3.6 V

PREU: Inclòs al microcontrolador

4.1.4 Mòdul Bluetooth

En referència al Bluetooth, s'han fet nombroses proves en un intent de fer servir el mòdul Bluetooth NINA-W10 integrat al microcontrolador. En teoria, aquest permet realitzar la connexió mitjançant Bluetooth clàssic. No obstant això, tot i haver fet molts intents no es va aconseguir fer-ho funcionar. A causa d'aquests problemes i a les recomanacions d'un fòrum d'Arduino [7], es va decidir comprar un mòdul Bluetooth HC-05 extern [11]. Aquests són molt utilitzats en projectes d'internet of things (IoT), ja que és molt senzill de configurar i el seu rendiment acostuma a ser suficient.

Més endavant, un cop comprat el sensor, es va descobrir que el mòdul Bluetooth integrat a la placa Arduino no ve configurat per defecte, i que és necessari configurar-lo mitjançant el mòdul ESP32 DEV. Malgrat això, es va decidir mantenir el component extern, ja que es va veure que funcionava correctament i no hi havia garanties que es pogués configurar el mòdul integrat fàcilment i sense perdre massa temps.

Les especificacions tècniques més rellevants d'aquest mòdul són les següents:

DIMENSIONS: 3,57 cm x 1,52 cm

PES: 3 g

DISTÀNCIA EFECTIVA: 10 m

TAXA DE TRANSMISSIÓ SÍNCRONA: 1 Mbps

TAXA DE TRANSMISSIÓ ASÍNCRONA: 2.1 Mbps

PERFILS SUPORTATS: UART/Serial

CONSUM: 30 mA - 50 mA (En repòs i connectat)

VOLTATGE D'OPERACIÓ: 3,3 - 6 V

PREU: 4,90 €

4.1.5 Probes de funcionament dels components

Un cop obtinguts tots els components, s'ha validat el correcte funcionament de cadascun d'ells.

Per fer-ho, s'han fet proves aïllades de cada component, assegurant la precisió i la repetició de les mesures obtingudes.

4.1.6 Integració dels components

Finalment, per realitzar la connexió entre tots els anteriors components, ha sigut necessària una petita placa protoboard de 400 pins [12].

A continuació es mostren dos diagrames realitzats amb Fritzing. El primer amb la vista dels components connectats a la placa de proves, i el segon en un format esquemàtic. En ambdós es poden veure totes les connexions:

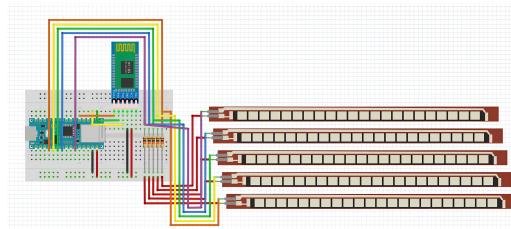


Fig. 2: Diagrama de connexions en placa de proves

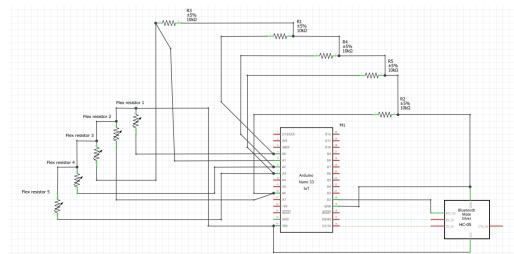


Fig. 3: Diagrama de connexions esquemàtic

4.2 Transmissió de dades

En la tercera fase, s'ha desenvolupat un sistema de transmissió de les dades fent servir el protocol de comunicació UART a través del mòdul de Bluetooth convencional HC-05 i el microcontrolador Arduino.

El funcionament d'aquest sistema és el següent: Primerament, s'ha configurat el transmissor del HC-05 a un baud rate de 115200 mitjançant comandes AT [15]. Aquest baud rate permet garantir un amplada de banda suficient per no provocar retards en la transmissió.

Seguidament, es fa la lectura dels diferents sensors. Primer els sensors de força resistiva i després les dades del giroscopi.

Donat que les dades de l'acceleròmetre no s'han aconseguit traduir al moviment del model 3D, s'ha decidit ometre aquestes dades i, per tant, no es llegeixen ni s'envien.

Per últim, la transmissió es fa a través de l'enviament pseudo-síncron de paquets amb el format següent:

TAULA 1: FORMAT DELS PAQUETS BLUETOOTH

Camp	Descripció
T<tPrev>	Temps de l'iteració anterior (μ s)
A<gx>	Giroscopi component X ($^{\circ}$ /s, 4 decimals)
B<gy>	Giroscopi component Y ($^{\circ}$ /s, 4 decimals)
C<gz>	Giroscopi component Z ($^{\circ}$ /s, 4 decimals)
D<flex1>	Flexió dit polze (0–1023)
E<flex2>	Flexió dit índex (0–1023)
F<flex3>	Flexió dit mitjà (0–1023)
G<flex4>	Flexió dit anular (0–1023)
H<flex5>	Flexió dit petit (0–1023)
#	Final de paquet

A la taula anterior es pot observar que el paquet està dividit de tal forma en què s'envia primer una marca de temps que delimita el que s'ha trigat a enviar el paquet anterior; seguidament s'envien les dades del giroscopi, després les dades dels sensors de força resistiva i, finalment, el delimitador del paquet. Cada camp està compost d'un caràcter identificador i el valor de la variable amb la dada del sensor corresponent. Cadascun d'aquests camps se separa amb una coma.

Per garantir una transmissió fluida, s'ha afegit un límit de temps de 6,4 ms per l'enviament de cada paquet. En cas que el temps de transmissió d'un paquet superi aquest límit, a la següent iteració no s'envien les dades del giroscopi.

Les dades dels sensors flexibles s'envien sempre, ja que la seva transmissió és crítica per garantir un moviment fluit dels dits.

El temps màxim s'ha definit calculant el temps mitjà d'enviament, el qual ha estat de 6,1 ms.

4.3 Visualització 3D

El següent pas en aquest projecte ha estat la creació d'un model i un entorn de visualització 3D. L'objectiu d'això és veure el moviment del guant traslladat a un model 3D en temps real.

Pel que fa al modelatge 3D, una de les aplicacions gratuïtes més utilitzades és Blender [16]. Aquesta permet tant modelar des de zero com importar models ja creats i modificar-los segons es necessiti.

Donat que és una opció amb molta documentació i tutorials d'aprenentatge, s'ha escollit aquesta aplicació per a la realització d'aquesta part del projecte.

D'altra banda, existeixen molts motors gràfics 3D [17] gratuïts en els quals es poden fer projectes complexos de visualització 3D, com poden ser Unity [18], Unreal Engine [19], Godot [20], etc.

En aquest cas, després d'haver fet proves amb els tres exemples mencionats, s'ha optat per l'entorn Unity. Aquesta decisió s'ha pres principalment pel fet que Unity ha sigut l'opció amb la corba d'aprenentatge més ràpida.

4.3.1 Entorn 3D

Per poder representar visualment el moviment de les mans, el primer pas és construir una escena en el motor gràfic, en aquest cas en Unity. En aquesta escena s'ha d'importar en format .FBX el model 3D prèviament construït.

Un cop importat el model, s'ha creat un script en C# associat a aquest model, que s'encarrega de rebre les dades del prototip, aplicar un filtratge i, finalment, de fer la transformació corresponent a la mà virtual respecte al moviment en el guant.

En aquest script, les lectures del giroscopi es processen amb un filtre passa-baix exponencial que actua com a suavitzador del soroll i dels pics puntuals. Cada nou valor rebut s'interpolà amb l'estat filtrat anterior mitjançant una funció de lerp que depèn d'un paràmetre filterFactor. El valor d'aquest paràmetre es pot ajustar a valors d'entre 0,01 i 0,3, de manera que com més baix sigui aquest valor, més es prioritza la resposta ràpida als canvis, i a l'inrevés, factors més alts ofereixen transicions més suaus però amb un cert retard.

Un cop obtinguts els valors filtrats del giroscopi, les dades s'utilitzen per generar un quaternion de rotació global assignant cada eix x, y i z al paràmetre de yaw, pitch i roll respectivament. A continuació, aquests valors es multipliquen per una constant rotationScale que s'encarrega d'ajustar-ne la sensibilitat de gir. Finalment, el quaternion resultant s'aplica sobre l'orientació actual de la mà, assegurant així un moviment suau.

D'altra banda, cada lectura dels sensors de força resistiva es remapeja linealment a un angle compres entre 0° i 90° . Aquest angle de flexió es transforma al model 3D mitjançant una interpolació per assegurar una transició suau en els ossos de cada dit.

Per últim, s'han provat diferents tipus de filtratge a les dades procedents de l'acceleròmetre. Tanmateix, no s'ha aconseguit realitzar un filtratge efectiu que permetés traslladar el desplaçament en l'espai de forma correcta. Per conèixer els possibles motius i solucions, consultar l'apartat de limitacions i possibles millores.

Addicionalment, s'ha creat una petita interfície gràfica d'usuari (GUI) a l'escena on es mostren una sèrie de dades rellevants:

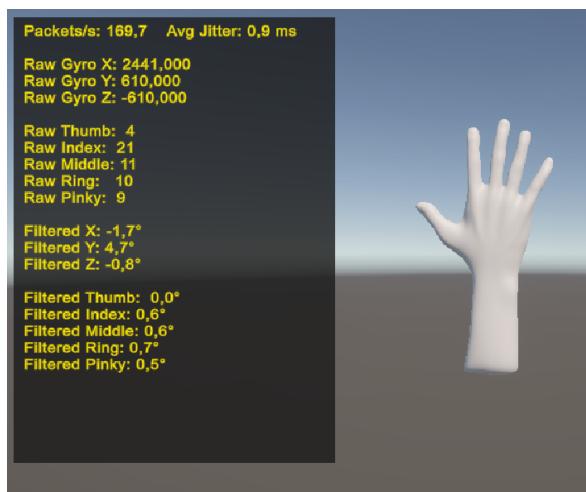


Fig. 4: GUI escena 3D

Aquestes dades poden dividir-se en tres tipus:

- **Dades de transmissió:** Aquestes es componen per dos valors. El nombre de paquets rebuts i el jitter mitjà de l'últim segon.

- **Dades dels sensors brutes (Raw) :** Dades rebudes i sense processar dels sensors

- **Dades dels sensors filtrades (Filtered):** Dades dels sensors un cop processades

4.3.2 Model 3D

A causa de la nul·la experiència modelant, s'ha optat per fer una importació d'un model gratuït de mà. Cercant, s'han trobat models de tota mena. Hi ha de molt senzills i sense articulacions i altres de molt complexos. Finalment, s'ha escollit una alternativa de complexitat intermitja d'un model obtingut a la web de Blender Artists Community [21]. Aquest té una forma natural i realista de mà i consta d'un rígg que permet simular correctament les articulacions i ossos de la mà sense arribar al punt en què no s'entengui com funciona.

Únicament s'han hagut de fer petites modificacions a aquest model per afegir un punt d'articulació més a cada dit. Això s'ha fet amb l'objectiu d'aconseguir una flexió més realista en els casos de gran flexió. Sense aquesta modificació, es produïa una deformació a la mà quan es tractava de flexionar al màxim els dits.

A continuació es mostra l'aspecte del model 3D amb i sense les modificacions realitzades:

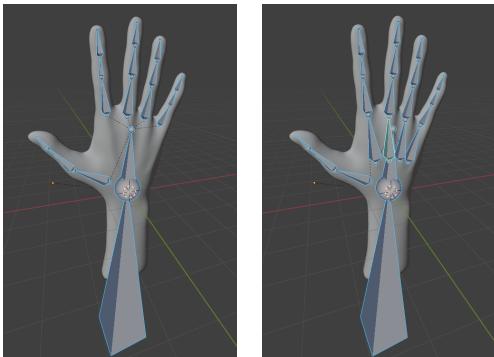


Fig. 5: Model 3D sense modificar (esquerra) i modificat (dreta).

4.4 Exportació de dades

Finalment, s'ha implementat un sistema d'exportació de dades a Unity, que permet agrupar tota la informació rellevant de l'escena 3D de forma ordenada.

El sistema s'ha desenvolupat mitjançant un segon script associat al model 3D, el qual s'executa paral·lelament a l'-explicat en l'apartat anterior. Aquest registra en un interval de temps fixat a 60 frames per segon (FPS) la rotació de l'objecte de la mà virtual en l'escena i de cadascun dels seus ossos. Únicament s'estreu la rotació en comptes de guardar també la posició, a causa del fet que no s'ha pogut implementar el desplaçament en l'espai i, per tant, amb les rotacions és suficient per guardar els moviments realitzats.

De forma provisional, es guarden i exporten aquestes dades a un arxiu .CSV amb la finalitat de comprovar que les

dades recollides siguin fidels a la realitat. Aquest fitxer té l'estructura següent:

TAULA 2: ESTRUCTURA DEL FITXER .CSV

Columna	Descripció
timestamp	Temps de transmissió (s)
palm_rx	Rotació X palma
palm_ry	Rotació Y palma
palm_rz	Rotació Z palma
thumb.01.R_rx	Rotació X polze proximal
thumb.01.R_ry	Rotació Y polze proximal
thumb.01.R_rz	Rotació Z polze proximal
thumb.02.R_rx	Rotació X polze medial
thumb.02.R_ry	Rotació Y polze medial
thumb.02.R_rz	Rotació Z polze medial
... i així successivament per cada os de la mà	

Per demostrar que la captura hagi estat correcta, s'ha desenvolupat un tercer i últim script que fa una lectura d'aquest arxiu i reproduceix els moviments capturats en el mateix.

S'ha pogut comprovar d'aquesta manera, observant que la reproducció és fluida i precisa, que les dades exportades són coherents i correctes.

Tanmateix, en el producte final l'exportació de les dades es faria directament des del microcontrolador, seguint un format JSON per poder enviar-les al sistema de traducció a veu. Malgrat això, a causa de la limitació de temps, aquesta funcionalitat no s'ha pogut implementar, i actualment només s'ha realitzat l'exportació de dades en format CSV.

5 RESULTATS

Aquest apartat recull els resultats que s'han obtingut en el desenvolupament del prototip de guants intel·ligents.

En primer lloc, cal mencionar que únicament s'ha fabricat un guant, principalment per manca de temps i recursos. Així i tot, donat que el funcionament seria exactament igual en els dos guants, es poden extrapoljar els resultats i entendre com funcionarien si hi hagués els dos.

Pel que fa a la funcionalitat, s'ha demostrat la capacitat de transferir amb gran precisió el moviment de rotació de tota la mà. Gràcies al giroscopi de l'IMU integrat en el guant, cada ajust de la palma es tradueix fidelment en el model virtual, cosa que permet una rotació contínua i sense salts. Les proves realitzades amb moviments suaus i ràpids han confirmat una latència òptima i una correspondència molt estreta entre la rotació real i la reproduïda.

Respecte a la flexió dels dits, els resultats han estat també satisfactoris. El sistema de sensors de flexió ha estat capaç de capturar amb una certa fiabilitat els graus d'arc de cada articulació, i la representació dels dits en el model 3D coincideix amb claredat amb la posició real dels articuladors.

Tot i això, la precisió aconseguida no és tan satisfactòria com en el cas de la rotació, ja que els sensors de força resistiva són molt sensibles a petites variacions. Cosa que dificulta l'estabilitat i la precisió de l'angle de flexió dels dits.

En contrast, la captura del desplaçament de la mà en l'espai ha resultat problemàtica. L'ús d'un únic acceleròmetre fa difícil distingir amb exactitud entre moviment i vibracions, especialment en trajectòries complexes o en canvis ràpids de direcció. Aquests factors han causat que les dades recollides mostren soroll i ha fet inviable una traducció fiable del desplaçament espacial.

Altrament, sobre la transmissió de les dades amb Bluetooth, es pot visualitzar a la (GUI) dins l'escena de Unity, el nombre de paquets rebuts i el jitter [14] mesurat durant l'últim segon. En aquest aspecte, s'ha aconseguit una molt bona qualitat de transmissió, amb una mitjana d'aproximadament 170 paquets per segon (un paquet cada 5,9 ms), i un jitter de tan sols 0,9 ms.

D'alta banda, un assoliment rellevant ha estat la implementació de l'exportació de gestos en format CSV. S'ha aconseguit generar un arxiu estructurat que pot ser interpretat de manera senzilla per un software extern. Aquesta solució, tot i ser provisional, facilita la lectura i l'anàlisi de les dades de gestos.

Finalment, s'ha validat la capacitat de reproducció dels gestos capturats mitjançant la lectura d'aquest arxiu CSV. El sistema importa les dades gravades i les tradueix a moviments del model 3D, demostrant la coherència entre la captura i la representació.

A continuació, es presenta una fotografia del prototip final de guant intel·ligent, on es poden apreciar els sensors integrats i la disposició dels components. Per veure vídeos del funcionament del prototip en el repositori GitHub del projecte[22].

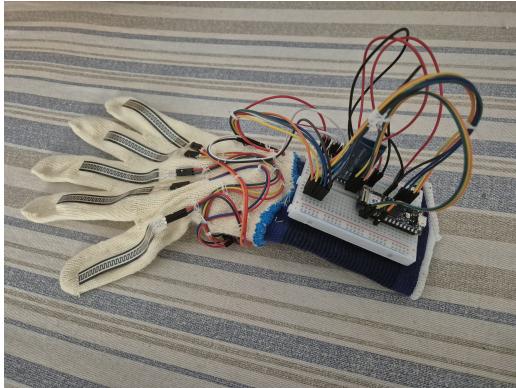


Fig. 6: Prototip de guant intel·ligent

6 LIMITACIONS I POSSIBLES MILLORES

En primer lloc, es destaquen les limitacions principals detectades durant el desenvolupament del prototip i les possibles millores que es podrien aplicar al mateix.

La principal limitació ha estat la captura del desplaçament de la mà en l'espai, ja que no s'han pogut obtenir dades fiables amb les quals fer la transformació del moviment. El problema que s'ha detectat, ha estat l'ús d'un sol acceleròmetre. És necessari tenir un punt de

referència estable, i la manca d'aquest produueix soroll i drift acumulatiu que dificulten qualsevol càcul de posició espacial.

Pel que fa al moviment dels dits, el sistema de sensors resistius no permet la detecció dels desplaçaments laterals, fet que fa que aquestes variants de gest quedin fora del rang de detecció. A més, el petit rang d'aquests sensors dificulta la flexió subtil dels dits, fent que en ocasions succeeixin petits salts. En un intent de solucionar aquest segon problema, s'ha comprovat que afegint un segon sensor a la part inferior de cada dit, no es milloren les mesures i que, per tant els mateixos sensors són la limitació principal.

Un altre aspecte pendent és la integració amb el sistema de traducció automàtica a veu. La manca de temps ha impedit establir una segona connexió Bluetooth que permetés el flux de dades simultani entre el guant i el servidor.

Finalment, l'estètica del prototip resulta poc atractiva per a un ús real, ja que els cables de connexió són massa llargs i queden exposats, donant una sensació de disseny provisinal.

En segon lloc, es proposen diverses línies de millora del producte.

Per resoldre el problema de captura de la posició espacial, seria recomanable incorporar un punt de referència. Per exemple, es podria fer servir un localitzador a cada guant, amb la finalitat que la mà esquerra faci servir a la dreta com a punt de referència, i a l'inrevés. D'aquesta forma es podríen complementar les dades de l'acceleròmetre amb informació de distància i trajectòria.

Respecte a la flexió dels dits, la principal millora seria l'ús de sensors amb un rang superior a 500 g, que permetessin detectar de forma més precisa la quantitat de flexió. Així s'obtindria un moviment més fluït i sense salts. Adicionalment a aquests sensors, es podríen afegir sensors d'estirament flexibles entre els dits, permetent la detecció del moviment horitzontal.

Finalment, per polir l'aspecte visual i ergonòmic, i obtenir guants amb disseny més compacte, s'hauria de reduir la longitud dels cables, i protegir tant aquests com la placa de proves amb una coberta, fent així el conjunt més resistent i estèticament apte.

7 CONCLUSIONS

En primer lloc, els resultats obtinguts han demostrat que el prototip de guant intel·ligent dissenyat és capaç de capturar amb precisió el moviment de rotació de la mà i la flexió dels dits, així com d'exportar aquestes dades en un format estructurat pel seu posterior processament amb el sistema de traducció a veu. Tot el flux de captura-exportació-reproducció ha funcionat de manera coherent, amb una latència mínima i uns nivells de soroll acceptables, especialment en el cas de la rotació. Aquestes troballes confirmen que és possible detectar gestos de la llengua de signes emprant únicament sensors integrats al guant i sense recórrer a sistemes òptics externs, sempre tenint en compte les limitacions inherents als acceleròmetres i als sensors resistius.

Pel que fa a recomanacions futures, encara que un sistema basat en visió per computador pot resultar més eficient, un sistema basat exclusivament en sensors com el dissenyat, especialment millorant-lo amb les propostes anteriors, pot

ofrir avantatges clau en situacions en què la càmera topa amb limitacions. Per exemple, en entorns amb il·luminació escassa o intermitent, amb zones d'ombra o reflexos, o en àrees on la línia de visió es veu obstaculitzada, els sensors integrats mantenen una captura de gestos consistent, alhora que afavoreixen la mobilitat i l'autonomia de l'usuari, ja que no cal la presència d'un operari extern per gestionar la posició de la càmera.

AGRAÏMENTS

Vull expressar el meu agraiament més sincer al meu tutor, Daniel Soto Álvarez, per la seva supervisió atenta, l'interès continuat i els consells valuosos que han estat fonamentals al llarg de tot el desenvolupament d'aquest projecte.

També voldria agrair profundament al meu company i amic Sergio López Parejo, amb qui va sorgir la idea de realitzar aquests dos TFGs complementaris, per tot el seu suport incondicional, i la motivació que m'ha brindat en cada fase del procés.

Finalment, em sento afortunat de comptar amb l'ajuda i l'ànim de la meva família, la paciència i el recolzament de la qual han estat imprescindibles per portar aquest treball fins aquí. Gràcies a tots per fer possible la realització d'aquest projecte.

REFERÈNCIES

- [1] «Sign4ALL», Sign4ALL.[En línia]. Disponible: <https://www.sign4all.net/>
- [2] “Get started with our plugins for XR developers - Ultraleap documentation”. Ultraleap. Accedito el 6 de marzo de 2025. [En línia]. Disponible: <https://docs.ultraleap.com/>
- [3] “GitHub - FORTH ModelBased-Tracker/MonocularRGB_3D_Handpose_WACV18: Using a single RGB frame for real time 3D hand pose estimation in the wild”. GitHub. Accedito el 6 de marzo de 2025. [En línia]. Disponible: https://github.com/FORTH-ModelBasedTracker/MonocularRGB_3D_Handpose_WACV18
- [4] K. Kpakima, «Kenyan Innovator creates smart gloves that translate sign language into audible speech», PO-CIT. Telling The Stories And Thoughts Of The Under-represented In Tech., 28 de febrero de 2023. [En línia]. Disponible: <https://peopleofcolorintech.com/articles/kenyan-innovator-creates-smart-gloves-that-translate-sign-language-into-audible-speech/>
- [5] Z. Zhou et al., «Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays», Nature Electronics, vol. 3, n.o 9, pp. 571-578, jun. 2020, <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0428-6>
- [6] Insider Tech. Incredible sign language gloves. (6 de mayo de 2016). Accedito el 23 de diciembre de 2024. [Video en línia]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=RHTrAXsULOI>
- [7] «Can the NANO IOT 33 run Full Bluetooth (NOT BLE)?», Arduino Forum, 19 de diciembre de 2019. [En línia]. Disponible: <https://forum.Arduino.cc/t/can-the-nano-iot-33-run-full-Bluetooth-not-ble/626990>
- [8] «Arduino Nano 33 IoT», Arduino Official Store. [En línia]. Disponible: <https://store.Arduino.cc/products/Arduino-nano-33-iot?srsltid=AfmBOor40d4dUAQ-6gDku0pg3FjPF686jsBaMbuRQonLqdM83igYjuWm>
- [9] «Sensor flexible Sensor de presión de película delgada Módulo de sensor de fuerza Tipo de alta resistencia Tipo de sensor de presión Resistencia sensible a la fuerza 0-500g: Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». [En línia]. Disponible: https://www.amazon.es/dp/B08N68RG9Z?ref=ppx_yo2ov_dt_b_fed_asin_title
- [10] «STMicroelectronics Módulo inercial iNE-MO LSM6DS3» [En línia]. Disponible: <https://www.digikey.es/es/product-highlight/s/stmicroelectronics/lsm6ds3?srsltid=AfmBOoqXQOHncmHe3nTiWNYfYX-HULnHr-RymDiIhpuu8NDIlSuiA7Bz>
- [11] «Módulo Bluetooth HC-05 compatible con Arduino. BricoGeek HC-05-BT — BricoGeek.com». [En línia]. Disponible: <https://tienda.bricogeek.com/modulos-Bluetooth/800-modulo-Bluetooth-hc-05.html>
- [12] «AZDelivery MB-102 Mini Breadboard 400 Pin con 4 Barras de alimentación compatibles con Arduino con E-Book Incluido! Amazon.es: Informática». [En línia]. Disponible: https://www.amazon.es/dp/B07KKJSFM1?ref=ppx_yo2ov_dt_b_fed_asin_title&th=1
- [13] “¿Qué es el rigging en animación 3D y cómo funciona? — UNIR”. Accedit el 6 de març de 2025. [En línia]. Disponible: <https://www.unir.net/revista/ingenieria/rigging-3d-animation/>
- [14] Equipo editorial de IONOS, «¿Qué es el jitter? Definición y medidas preventivas», IONOS Digital Guide, 2 de marzo de 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/jitter/>
- [15] «Dictionary.com — Meanings & Definitions of English Words», Dictionary.com. 7 de enero de 2015. [En línia]. Disponible en: <https://www.dictionary.com/browse/baud-rate>
- [16] Blender Foundation, «blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software», blender.org. [En línia]. Disponible: <https://www.blender.org/>
- [17] MasterD, «¿Qué es y cómo funciona un motor gráfico?», MasterD, 10 de octubre de 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.masterd.es/blog>

g/que-es-como-funciona-motor-grafi
co

- [18] «Plataforma de desarrollo en tiempo real de Unity — Motor 3D, 2D, VR y AR», Unity. [En línea]. Disponible: <https://unity.com/es>
- [19] U. Engine, «La herramienta de creación 3D en tiempo real más potente - Unreal Engine», unrealengine.com. [En línea]. Disponible: <https://www.unrealengine.com/es-ES>
- [20] G. Engine, «Godot Engine - Motor de videojuegos 2D y 3D gratuito y de código abierto», Godot Engine. [En línea]. Disponible: <https://godotengine.org/es/>
- [21] «Realistic rigged human hand», Blender Artists Community, 28 de diciembre de 2015. [En línea]. Disponible: <https://blenderartists.org/t/realistic-rigged-human-hand/658854>
- [22] “guantes-Inteligentes-para-la-captura-de-lengua-de-signos/Videos at main · ropeiz/guantes-Inteligentes-para-la-captura-de-lengua-de-signos”. GitHub. Accedido el 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible: <https://github.com/ropeiz/guantes-Inteligentes-para-la-captura-de-lengua-de-signos/tree/main>