

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA  
SCUOLA POLITECNICA  
DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI LAUREA  
IN  
INGEGNERIA MECCANICA**

***Progettazione meccanica della configurazione ottimale  
di un guanto sensorizzato per il tracciamento  
del movimento della mano.***

**Relatore:**

*Prof. Mastrogiovanni Fulvio.*

**Correlatore:**

*Prof. Carfi Alessandro.*

**Allievo:**

*Baimukhambetov Daler*

Febbraio 2023



# ***Progettazione meccanica della configurazione ottimale di un guanto sensorizzato per il tracciamento del movimento della mano.***

## **Sommario**

La presente tesi ha come oggetto la modellazione e la prototipazione del supporto meccanico per un sistema di tracciamento del movimento della mano detto guanto sensorizzato, in inglese “Data Glove”, con successiva simulazione con il software OpenSim.

Per la realizzazione del guanto è stato utilizzato il sistema di sensori predisposto dal gruppo di ricerca affiliato con l’Università degli studi di Genova “TheEngineRoom” (TER), già utilizzato nella sperimentazione su una mano antropomorfa montata su un Cobot (Robot collaborativo) di nome Baxter. Tale sistema di sensori è composto da sensori IMU (unità di misura inerziale) per il tracciamento del movimento della mano, un'unità centrale e una batteria.

Lo scopo del lavoro era il trasferimento del sistema di tracciamento su una mano umana considerando tutte le problematiche che tale operazione comporta: slittamenti sensore-mano dovuti alla deformazione della pelle e alla sudorazione, modularità e flessibilità dei supporti, ergonomia e ingombro che comportano imprecisioni durante la fase di misurazione. Il sistema di supporti è stato modellato geometricamente e progettato utilizzando il software Autodesk Inventor. Avendo come obiettivo il soddisfacimento di alcune caratteristiche prestazionali e dimensionali, ogni singola parte è stata progettata ai fini di renderne possibile la realizzazione tramite Manifattura Additiva con tecnologia FDM (Fusion Deposition Modelling). Il percorso della seguente tesi ha portato attraverso un approccio dei problemi step-by step al raggiungimento degli obiettivi iniziali di modellare e costruire un prototipo di Data Glove economico e adatto all’utilizzo su una mano umana.



# *Mechanical design of the optimal configuration of a data glove for hand movement tracking.*

## **Abstract**

This thesis deals with the modeling and prototyping of the mechanical support for a hand movement tracking system called Data Glove, with subsequent simulation with OpenSim software.

For the creation of the Data Glove, the sensor system prepared by “TheEngineRoom” (TER), research group affiliated with the University of Genoa, was used, already employed in the experimentation on an anthropomorphic hand mounted on a Cobot (collaborative robot) called Baxter. This sensor system consists of IMU (inertial measurement unit) sensors for hand movement tracking, a central unit and a battery. The aim of the work was to transfer the tracking system to a human hand, considering all the problems that this operation entails: sensor-hand slips due to skin deformation and perspiration, modularity and flexibility of the supports, fit and size which lead to inaccuracies during the measurement stage.

The support system was geometrically modeled and designed using the Autodesk Inventor software. With the aim of satisfying certain performance and dimensional characteristics, each individual part has been designed in order to make it possible to create it using Additive Manufacturing, in particular FDM (Fusion Deposition Modelling) technology. The path of the following thesis led, through a step-by-step problem solving approach, to the achievement of the initial objectives of modeling and building a cheap Data Glove prototype suitable for use on a human hand.



# Indice

<b>Sommario</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Indice</b> .....	6
<b>1. Introduzione</b> .....	8
<b>2. La Mano</b> .....	11
<b>2.1 Generale</b> .....	11
<b>2.2 Struttura e anatomia</b> .....	11
<b>2.3 Modello cinematico</b> .....	14
<b>2.3.1 Generale</b> .....	14
<b>2.3.2 Catena cinematica</b> .....	14
<b>2.3.3 Cinematica diretta e inversa di catene cinematiche aperte</b> .....	16
<b>2.3.3.1 Cinematica diretta e convenzione di Denavit-Hartenberg</b> .....	17
<b>2.3.3.2 Cinematica inversa</b> .....	19
<b>2.4 Modello cinematico della mano</b> .....	21
<b>3. Tracciamento del movimento della mano</b> .....	24
<b>3.1 Sensori utilizzati</b> .....	24
<b>4. Progettazione e realizzazione dei supporti</b> .....	27

<b>4.1 Definizione del problema .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Altre specifiche .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4 Prototipazione rapida.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5 Ideazione e sviluppo .....</b>	<b>36</b>
<b>4.5.1 Anelli e supporti per sensori IMU. Processo di ideazione step-by-step.....</b>	<b>37</b>
<b>4.5.2 Modello finale e guanto completo.....</b>	<b>64</b>
<b>4.5.3 Supporti per robot e Scatola.....</b>	<b>67</b>
<b>5. OpenSim IMU Inverse Kinematics .....</b>	<b>76</b>
<b>Bibliografia e sitografia.....</b>	<b>78</b>

# 1. Introduzione

Le mani sono il principale mezzo di interazione con l'ambiente e di percezione tattile degli oggetti. Per queste ragioni, lo studio della mano e del suo movimento è di grande interesse in molti campi di ricerca, tra cui il campo medico [1], il riconoscimento dei gesti, e interfacce di interazione uomo-macchina [2]. Particolare attenzione deve essere prestata alle informazioni che il nostro cervello riceve dalle mani. Questa informazione riguarda sia la propriocezione della mano, cioè la capacità di determinare la sua posizione nello spazio, sia la capacità sensoriale di percepire le forze di contatto.

In questo elaborato di tesi, e nell'ambito del progetto "INDEX" portato avanti da "TheEngineRoom" (TER), è considerato l'aspetto che riguarda il movimento della mano nello spazio. In questo ambito esistono due principali approcci sensoriali:

1. Visione
2. Sensori indossabili

Il primo approccio presenta problematiche relative alla sensibilità alle variazioni di luminosità dell'ambiente circostante, e alle occlusioni che impedirebbero alle telecamere di individuare parti della mano. Al contrario l'utilizzo di sensori indossabili permette di svincolare la mano dal campo visivo della camera e dalle condizioni di luce ambientale. Tuttavia con questo approccio si corre il rischio di compromettere parzialmente il movimento della mano a causa delle dimensioni, del peso e della geometria del guanto.

I sistemi basati sui guanti sono la scelta più comune per l'acquisizione di dati sul movimento della mano e sono generalmente indicati con il termine "Data Glove" o guanto sensorizzato. Poiché la mano umana è di ridotte dimensioni ed è caratterizzata da un'elevata mobilità con cinematica fine e complessa, l'utilizzo di sensori per il tracciamento del suo movimento risulta complicato. Tuttavia la miniaturizzazione e il

decremento del costo dell'elettronica hanno reso l'approccio tramite sensori indossabili sempre più promettente eliminando il problema dell'ingombro e del costo.

Va notato che l'idea di un guanto sensorizzato non è un concetto nuovo poiché la proposta iniziale per un dispositivo di questo tipo è stata presentata per la prima volta nel 1982 da Zimmerman, quando ha depositato una domanda di brevetto per un guanto che utilizzava sensori ottici flessibili per misurare la flessione delle dita [3]. Successivamente, Lanier si unì a lui e svilupparono il "Power Glove" [4], che include tecnologie ultrasoniche e magnetiche per tracciare la posizione della mano. Da allora, l'utilizzo di questi dispositivi è cresciuto nel tempo, soprattutto nel campo della ricerca e, ad oggi, è disponibile un'ampia gamma di guanti sensorizzati, che vanno dalle soluzioni commerciali a quelle personalizzate. Sono disponibili diversi modelli con diverse configurazioni del sensore, tra cui: 5DT Data Glove Ultra, Hi5 VR Glove e Manus Prime II, che sono tra i più popolari. Riassumendo, il loro principale vantaggio è quello di essere "plug and play" (collega e usa), mentre gli svantaggi sono la mancanza di flessibilità nella scelta dei componenti e il prezzo elevato.

Lo sviluppo di un "Custom Data Glove" (guanto sensore personalizzato) permette di rendere il processo di misurazione flessibile e modulare, lasciando la possibilità di adattare il sistema a diverse modalità di utilizzo.

Lo scopo principale del progetto è quello di creare un sistema di misurazione del movimento della mano standardizzato per fornire uno strumento facilmente riproducibile. Tale necessità deriva dal fatto che i guanti sensore esistenti, sia in commercio sia nell'ambito della ricerca, non seguono procedimenti standard né dal punto di vista hardware né per quanto riguarda l'acquisizione dei dati. Spesso nello stato dell'arte queste caratteristiche tecniche non vengono spiegate in dettaglio il che costituisce un grosso impedimento per la ripetibilità delle procedure volte alla rilevazione e al tracciamento del movimento della mano umana.

Nel seguente elaborato di tesi vengono descritte la modellazione e la prototipazione dei supporti per il sistema di sensori con la conseguente simulazione di utilizzo del guanto con il software OpenSim.

## **2. La Mano**

### **2.1 Generale**

La mano è uno strumento complesso presente nel corpo umano per svolgere un'enorme quantità di funzioni diverse nella vita di tutti i giorni. La mano permette di afferrare gli oggetti e grazie alla sua struttura può assumere pressoché un infinito numero di posizioni ed effettuare un infinito numero di movimenti e azioni. In natura la capacità di afferrare gli oggetti si ritrova in un numero diverso di specie ma in nessuna di queste raggiunge lo stesso grado di perfezione dell'uomo. La mano, inoltre, non è specializzata in una funzione particolare ma è uno strumento altamente flessibile tra diverse tipologie di azioni. Da un punto di vista fisiologico la mano rappresenta l'organo terminale dell'arto superiore che ne costituisce il supporto e le permette di orientarsi nel modo migliore possibile per svolgere un determinato compito. Questa non è soltanto un organo operativo ma è anche un organo esplorativo e recettivo in grado di trasferire all'uomo informazioni essenziali alla conoscenza del mondo circostante e al suo stesso funzionamento..

### **2.2 Struttura e anatomia**

Dal punto di vista strutturale e anatomico la mano umana può essere divisa in quattro sottosistemi principali:

1. Struttura ossea
2. Articolazioni

### 3. Struttura Muscolare

### 4. Tendini

Prendendo in considerazione la struttura ossea e le articolazioni, la mano ha un pollice e quattro dita. Le ultime quattro dita sono costituite da tre ossa chiamate:

- falangi distali
- falangi intermedie
- falangi prossimali

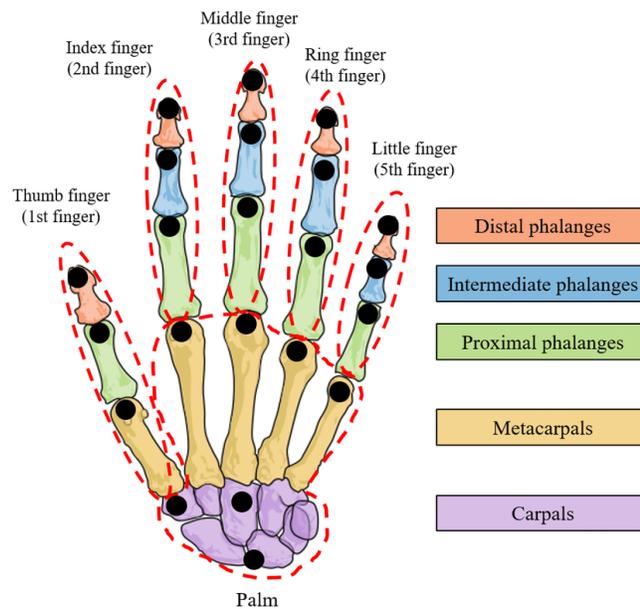


Figura 1, struttura ossea della mano, falangi, [5]

Le tre ossa sono collegate da articolazioni chiamate:

- meta-carpo-falangea (MCP)
- prossimale-interfalangea (PIP)
- distale-interfalangea (DIP)

Il pollice è diverso dalle altre dita perché ha solo due ossa chiamate falangi distale e prossimale, ma è comunque caratterizzato da tre articolazioni:

- la trapezio-metacarpale (TM)
- la metacarpo-falangea (MCP)
- la distale-interfalangea (DIP)

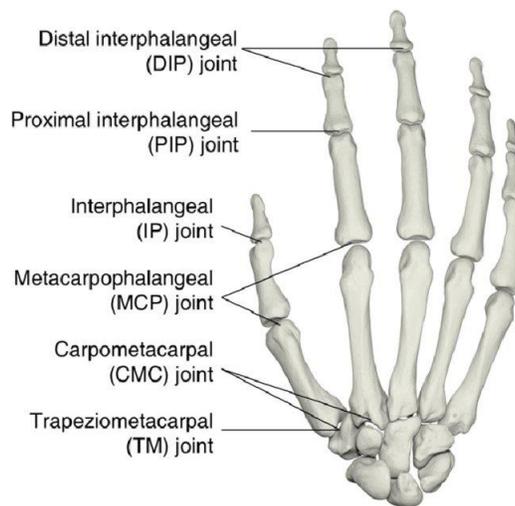


Figura 2, struttura ossea della mano, articolazioni, [6]

[7] Le articolazioni sopra descritte consentono di avere molteplici gradi di libertà così distribuiti: uno per i DIP e PIP che possono eseguire solo piegamenti ed estensioni e due per gli MCP che possono eseguire anche movimenti di adduzione e abduzione.

L'articolazione TM, che è presente solo nel pollice e lo collega alle ossa carpali, consente la capacità di opposizione alle altre dita abilitando due gradi di libertà aggiuntivi. Finora sono stati descritti 21 gradi di libertà: quattro per ogni dito e cinque per il pollice. Questo numero di gradi di libertà può essere adattato alle esigenze della ricerca ed è comune considerare solo una versione semplificata del modello (es. solo tre dita o solo 1 articolazione per ogni dito).

## **2.3 Modello cinematico**

### **2.3.1 Generale**

Un modello cinematico è un modello matematico che descrive il moto di un oggetto o di un sistema di oggetti senza considerare le forze che lo causano. Questo tipo di modello è comunemente utilizzato nella fisica, nell'ingegneria e nella robotica per studiare il movimento degli oggetti e prevederne il comportamento.

I modelli cinematici sono tipicamente basati sui principi della cinematica. I modelli cinematici possono essere utilizzati per descrivere un'ampia gamma di movimenti, dal semplice movimento di un oggetto in caduta al movimento complesso di un braccio robotico.

Uno dei principali vantaggi dell'utilizzo dei modelli cinematici è che sono relativamente semplici da comprendere e da implementare. Possono essere utilizzati per prevedere rapidamente e facilmente il movimento di un oggetto senza la necessità di calcoli complessi o una conoscenza dettagliata delle forze che agiscono sull'oggetto. Un altro vantaggio dei modelli cinematici è che sono versatili e possono essere applicati a un'ampia gamma di situazioni. Ad esempio, un modello cinematico può essere utilizzato per studiare il movimento di un braccio robotico mentre si sposta attraverso una serie di posizioni.

### **2.3.2 Catena cinematica**

Una catena cinematica è una serie di corpi rigidi e giunti interconnessi utilizzati per creare un movimento desiderato. Queste catene possono essere trovate in una vasta

gamma di sistemi meccanici, dai bracci robotici agli arti umani. Il concetto di catene cinematiche è strettamente correlato a quello di meccanismi, che sono qualsiasi dispositivo che converte un tipo di movimento in un altro. Le catene cinematiche, d'altra parte, si concentrano specificamente sul movimento dei corpi rigidi e dei giunti all'interno del sistema.

Una delle caratteristiche chiave delle catene cinematiche è il loro grado di libertà. Si riferisce al numero di movimenti indipendenti che il sistema è in grado di eseguire. Ad esempio, un braccio umano ha sei gradi di libertà, che gli consentono di muoversi in un'ampia gamma di direzioni. Le catene cinematiche possono essere classificate in due tipi principali: aperte [Figura 3] e chiuse [Figura 4]. Una catena cinematica aperta ha almeno un corpo che non è connesso al resto del sistema, mentre una catena cinematica chiusa ha tutti i suoi corpi collegati per formare un anello.

Lo studio delle catene cinematiche è una parte fondamentale del campo della meccanica e ha molte applicazioni pratiche. Ad esempio, in robotica, la progettazione di catene cinematiche è fondamentale per creare sistemi in grado di muovere e manipolare oggetti. In biomeccanica, lo studio delle catene cinematiche aiuta a comprendere il movimento del corpo umano e può essere utilizzato per progettare protesi e altri dispositivi di assistenza.

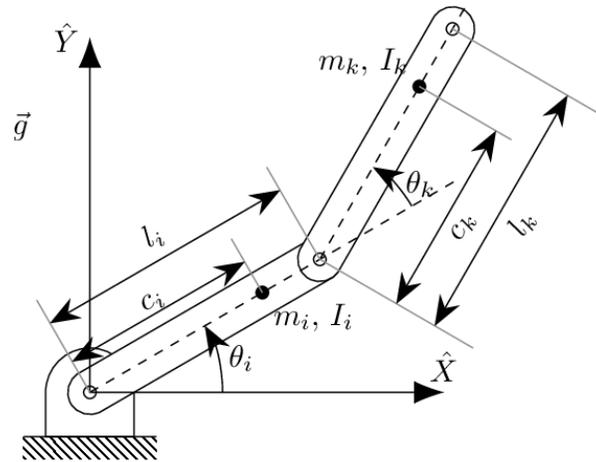


Figura 3, catena cinematica aperta a due corpi fissata a terra a un'estremità, [8]

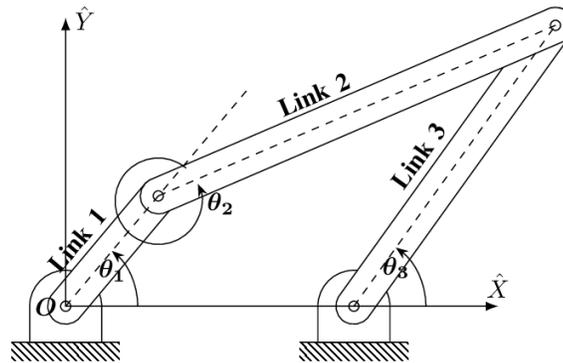


Figura 4, catena cinematica chiusa a 4 corpi, [8]

### 2.3.3 Cinematica diretta e inversa di catene cinematiche aperte

Di seguito si tratterà la cinematica delle catene cinematiche aperte, necessaria per comprendere il modello cinematico di una mano umana le cui dita sono schematizzabili con catene cinematiche aperte, tale modello cinematico verrà descritto nella sezione 2.4. La formulazione del modello cinematico di un meccanismo richiede che venga definita la topologia del sistema (numero corpi, numero e tipo di coppie cinematiche, connessioni tra corpi e coppie, eventuali corpi fissi (telaio)), e che venga estratta dalla forma fisica dei

corpi l'informazione geometrica effettivamente rilevante ai fini dello studio del movimento. [9]

I principali problemi cinematici nello studio di catene cinematiche sono:

- Cinematica diretta
- Cinematica inversa
- Cinematica differenziale

Mentre le prime due trattano le posizioni dei punti all'interno della catena cinematica la cinematica differenziale si occupa di relazionare le velocità dei giunti con quella dell'estremità libera della catena [10], poiché lo scopo della presente trattazione è l'analisi di posizione della mano e delle dita (che sono delle catene cinematiche aperte), e in particolare l'introduzione del problema della cinematica inversa che è necessaria per comprendere la funzionalità "IMU Inverse Kinematics" del software OpenSim, il problema della cinematica differenziale non è qui descritto.

### **2.3.3.1 Cinematica diretta e convenzione di Denavit-Hartenberg**

Una catena cinematica è costituita da un insieme di corpi rigidi (bracci o link) connessi in cascata tramite coppie cinematiche o giunti. I giunti possono essere fondamentalmente di due tipi: giunti di rotazione, o rotoidali, e giunti di traslazione, o prismatici. In una catena cinematica aperta un estremo della catena è vincolato a una base, mentre l'altro è l'estremo libero.

La struttura meccanica della catena è caratterizzata da un numero di gradi di libertà che ne determinano la configurazione. Ogni grado di libertà viene tipicamente associato a una articolazione di giunto e costituisce una variabile di giunto.

La cinematica diretta si occupa di determinare la posizione e l'orientamento dell'estremo libero in funzione dei valori assunti dalle variabili di giunto.

Per fare ciò, come prima cosa, si fissa un sistema di coordinate, detto sistema base  $S_0$ .

Così facendo è possibile esprimere anche le coordinate dell'estremo libero nel sistema  $S_0$ .

Per ricavare la posizione dell'estremo libero si scrive:

$$\begin{cases} x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$$

La matrice che esprime l'orientamento del sistema  $S_2$  rispetto al sistema  $S_0$  risulta:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

Per calcolare l'equazione cinematica diretta di una catena aperta è necessario delineare un metodo generale e sistematico per definire posizione e orientamento relativi di due bracci consecutivi; il problema è così ricondotto all'individuazione di terne solidali a ciascun braccio e alla determinazione della trasformazione di coordinate che lega le due terne. E' opportuno stabilire delle regole di scelta delle terne stesse per poter arrivare a scrivere una procedura sistematica.

Si consideri il caso indicato in figura:

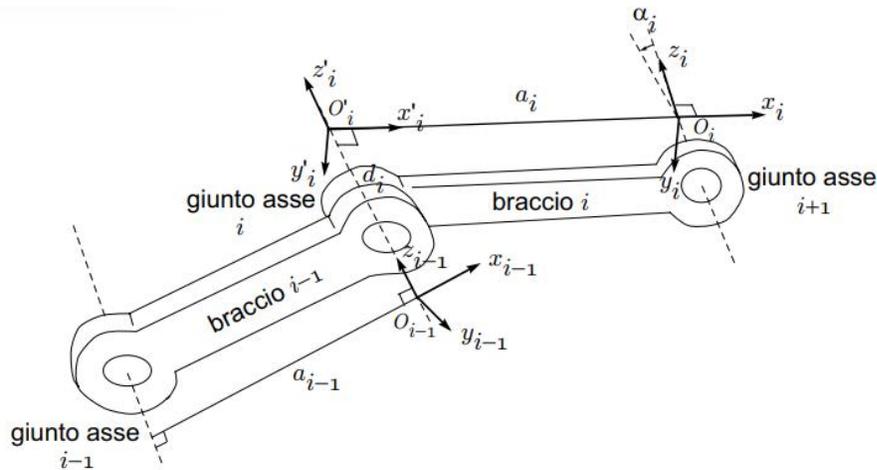


Figura 5, Convenzione di Denavit-Hartenberg, [10]

Detto  $i$  l'asse del giunto che connette il braccio  $i-1$  al braccio  $i$ , per definire la terna  $i$  (solidale al braccio  $i$ ) si opera secondo la Convenzione di Denavit-Hartenberg:

1. Scegliere l'asse  $z_i$  lungo l'asse del giunto  $i+1$ ;
2. Si individua  $O_i$  come l' intersezione dell'asse  $z_i$  con la normale comune agli assi  $z_{i-1}$  e  $z_i$  e con  $O_{i'}$  si indica l' intersezione della normale comune con  $z_{i-1}$  ;
3. Scegliere l'asse  $x_i$  diretto lungo la normale comune agli assi  $z_{i-1}$  e  $z_i$  con verso considerato positivo se va dal giunto  $i$  al giunto  $i+1$ ;
4. Scegliere l'asse  $y_i$  ortogonale agli assi precedentemente ricavati.

Una volta definite le terne solidali ai bracci, la posizione e l'orientamento della terna  $i$  rispetto alla terna  $i-1$ , sono completamente definiti anche i seguenti parametri:

- $a_i$  - distanza di  $O_i$  da  $O_{i'}$ .
- $d_i$  - coordinata su  $z_{i-1}$  di  $O_{i'}$ .
- $\alpha_i$  – angolo intorno all' asse  $x_i$  tra l'asse  $z_{i-1}$  e l'asse  $z_i$  valutato positivo in senso antiorario.
- $\Theta_i$  – angolo intorno all'asse  $z_{i-1}$  tra l'asse  $x_{i-1}$  e l'asse  $x_i$  valutato positivo in senso antiorario.

I parametri  $a_i$  e  $\alpha_i$  si suppongono noti e costanti; dei rimanenti due, uno solo è variabile, a seconda del tipo di giunto che si utilizza per connettere il braccio  $i-1$  con il braccio  $i$ ; difatti, se il giunto è rotoidale, allora la variabile risulta essere  $\Theta_i$ , mentre se il giunto è prismatico allora la variabile è  $d_i$ .

Per un'analisi più approfondita della trasformazione delle coordinate si rimanda a [10]

### 2.3.3.2 Cinematica inversa

Il problema cinematico inverso consiste nello studio di alcune proprietà e tecniche di calcolo per ottenere informazioni utili sulle variabili di giunto  $\Theta_i$  una volta nota la posizione dell'estremo libero nello spazio.

La soluzione di questo problema può non esistere o addirittura ve ne possono essere infinite. Se si considera il meccanismo a due bracci indicato in figura 6:

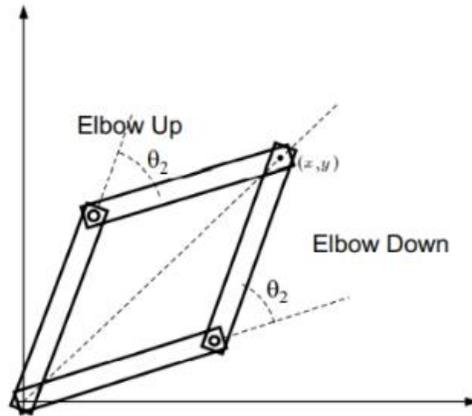


Figura 6, indeterminazione di posizione, [10]

è evidente che, date le coordinate  $(x, y)$  dell'estremo libero esistono due diverse variabili di giunto  $\theta_1$  e  $\theta_2$  che portano in quella posizione. Tale problema provoca indeterminazione. Per capire analiticamente il problema si consideri a tal proposito il caso indicato in figura 7:

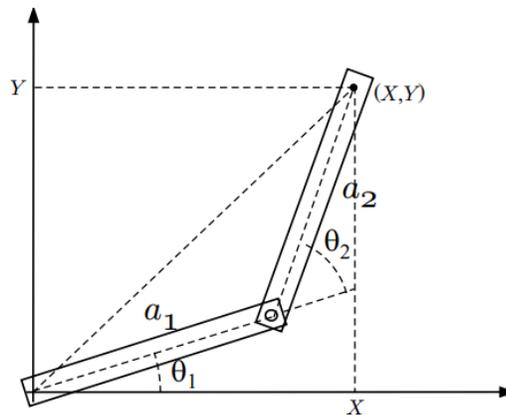


Figura 7, catena cinematica a 2 corpi, [10]

Per il teorema del coseno (teorema di Carnot) si ha che:

$$X^2 + Y^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\theta_2)$$

Per cui:

$$-\cos(\theta_2) = \frac{X^2 + Y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \equiv D$$

e quindi:

$$\theta_2 = \cos^{-1}(-D) \quad \text{e} \quad \sin(\theta_2) = \pm\sqrt{1 - D^2}$$

per cui  $\theta_2 = \tan^{-1} \pm \frac{\sqrt{1-D^2}}{D}$  dove il segno  $\pm$  indica le configurazioni di tipo Elbow Up o Elbow Down.

Ricapitolando, quindi, mentre il problema della cinematica diretta ha sempre una sola soluzione che è ottenuta semplicemente risolvendo le equazioni dirette, il problema della cinematica inversa può avere oppure può non avere soluzione e, se tale soluzione esiste, può non essere unica. Inoltre queste equazioni sono funzioni non lineari molto complicate nelle variabili dei giunti e le soluzioni sono difficili da ottenere in forma analitica. [10]

## 2.4 Modello cinematico della mano

Un modello cinematico della mano umana è una rappresentazione matematica del movimento della mano e dei suoi componenti, come le dita e il polso. Questo tipo di modello è comunemente utilizzato in robotica, biomeccanica e computer grafica per simulare e analizzare il movimento della mano.

Per creare un modello cinematico della mano umana, è necessario prima raccogliere dati sull'anatomia della mano e sul suo raggio di movimento. Questo può essere fatto attraverso vari metodi, [11] non invasivi: motion capture (tracciamento ottico), l'imaging a raggi X, l'imaging a risonanza magnetica (MRI), o invasivi come la dissezione del cadavere. Una volta raccolti i dati, vengono utilizzati per creare una rappresentazione matematica delle ossa e delle articolazioni della mano, nonché dei muscoli e delle altre strutture che ne controllano il movimento. Il modello risultante può quindi essere utilizzato per simulare e analizzare il movimento della mano in diversi scenari. Ad

esempio, un modello cinematico della mano può essere utilizzato per studiare come la mano afferra e manipola oggetti di diverse forme e dimensioni, o come si muove in risposta a diverse forze e vincoli. Queste informazioni possono essere preziose per migliorare il design delle mani robotiche o per comprendere i meccanismi della mano umana in condizioni di salute e malattia. Il modello cinematico della mano umana è un potente strumento per studiare e simulare il suo movimento. Catturando la complessa anatomia e il movimento della mano, questo tipo di modello può essere utilizzato in un'ampia gamma di applicazioni, dalla robotica e la computer grafica alla biomeccanica e alla medicina.

Generalmente nei modelli cinematici della mano ogni dito viene visto come una catena cinematica a 3 corpi collegati tra loro tramite coppie cinematiche di diverso tipo. I 3 corpi sono rappresentati dalle ossa delle falangi mentre le coppie cinematiche sono rappresentate dalle articolazioni. Le articolazioni a 1 grado di libertà sono tutte rappresentabili da coppie a cerniera; le articolazioni a 2 gradi di libertà possono essere divise in due tipi. L'articolazione metacarpale del pollice (la metacarpo-falangea, MCP) è un'articolazione a sella (i due corpi sono biassiali concavi e convessi a incastro reciproco e permettono una rotazione assiale). Al contrario, le articolazioni metacarpali delle dita sono condiloidi (funzionano in maniera simile a una coppia sferica a eccezione del fatto che non possono ruotare di 360 gradi, bloccano la rotazione assiale). La principale differenza tra le articolazioni a sella e quelle condiloidee è che le articolazioni condiloidee hanno assi (approssimativamente) intersecanti, che le articolazioni a sella non hanno. Le articolazioni condiloidi e a sella sono ulteriormente suddivise in articolazioni i cui assi di rotazione sono ortogonali e articolazioni i cui assi di rotazione sono disposte a un angolo arbitrario l'uno rispetto all'altro. Inoltre, sono definite una coppia a cerniera con una rotazione longitudinale accoppiata, una coppia sferica e una coppia a 3 gradi di libertà con assi non intersecanti. [12]

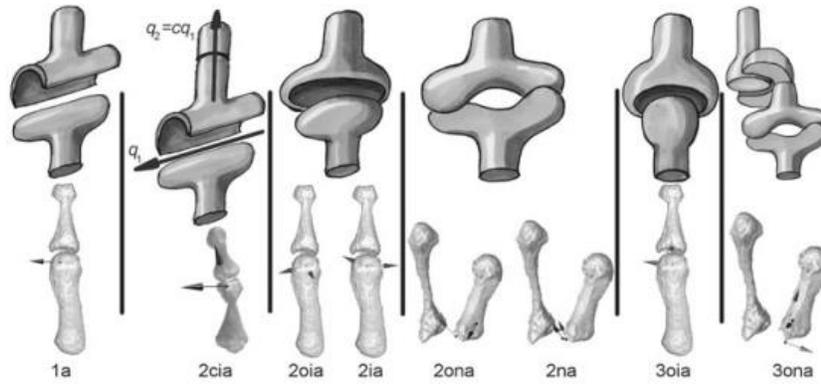


Figura 7, tipi di articolazioni e coppie utilizzate nel modello da [12]

Diversi studi sono stati effettuati sulla modellazione cinematica della mano. Per la stesura di questo elaborato è stato utilizzato il modello cinematico della mano destra riprodotto grazie all'Imaging a Risonanza Magnetica (MRI) da Georg Stillfried, Ulrich Hillenbrand, Marcus Settles e Patrick van der Smagt, il procedimento è descritto in [12]

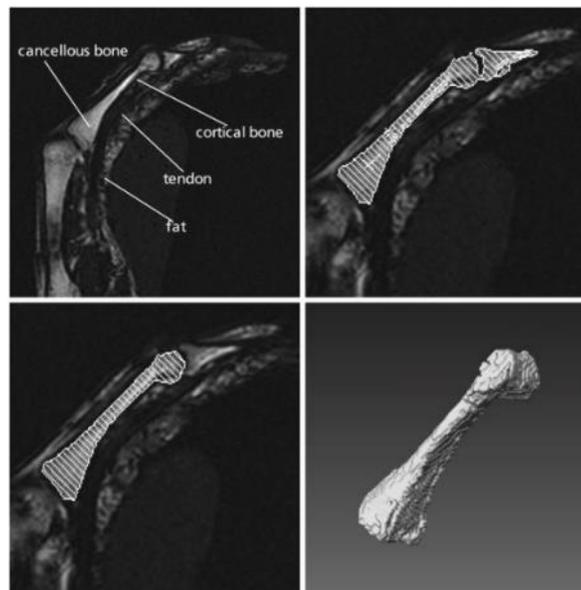


Figura 8, processo di segmentazione su immagini ottenute dalla risonanza magnetica. [13]

## **3. Tracciamento del movimento della mano**

Gli esseri umani hanno capacità di percezione altamente sviluppate che consentono loro di ottenere molteplici informazioni attraverso l'uso di tutti e cinque i sensi.

Concentrandosi sullo studio delle mani, ci sono due aspetti particolarmente significativi da considerare: la propriocezione e il tatto. La propriocezione si riferisce alla capacità di determinare continuamente la posizione della mano e delle dita mentre quella riferita al tatto consiste principalmente nel riconoscimento delle forze che agiscono sulla mano.

[14]

L'obiettivo principale della sensorizzazione della mano è quello di estrarre queste informazioni dal suo movimento e l'efficacia di questo processo è influenzata dalle proprietà degli strumenti impiegati. Un sistema di percezione di questo tipo può generalmente essere diviso in due parti: una per la raccolta di informazioni sensoriali (unità di rilevamento) e un'unità di elaborazione che può ottenere le informazioni desiderate dalle letture grezze del sensore.

Le informazioni relative alla propriocezione della mano vengono raccolte utilizzando apparecchiature in grado di tracciarne la posizione e l'orientamento nel tempo. Questo tipo di strumenti sono spesso indicati come sistemi di tracciamento e possono sfruttare diverse tecnologie (ad esempio sistemi ottici e dispositivi indossabili)

### **3.1 Sensori utilizzati**

Il progetto si basa sullo studio dei guanti sensorizzati e, in questo caso, la stima delle rotazioni articolari avviene tramite sensori. Le quantità fisiche misurate per stimare la rotazione articolare e le modalità operative dipendono dal tipo di sensore, di conseguenza si sono individuate due diverse categorie di sensori per i guanti sensore:

- Sensori a flessione (Flex sensor)
- Unità di Misura Inerziale (IMU)

I sensori Flex si comportano come resistenze che variano a seconda della flessione a cui sono sottoposti e sfruttano le caratteristiche dei materiali di cui sono fatti. Tuttavia questo tipo di sensore non è adatto allo scopo del progetto in quanto si vuole creare un sistema modulare che possa essere utilizzato sia su una mano umana sia su una mano robotica antropomorfa. Per questo motivo nell'ambito del progetto sono stati utilizzati sensori di tipo IMU (inertial measurement unit).

Le unità di misura inerziali sono sensori a 9 assi dotati di un accelerometro, un giroscopio ed eventualmente un magnetometro per asse (a 6 assi nel caso in cui non sia presente il magnetometro) e servono a misurare l'accelerazione lineare, la velocità angolare e il campo magnetico (nel caso in cui il magnetometro sia incluso nell'unità). Le IMU sono solitamente utilizzate in coppia e la rotazione del giunto può essere stimata combinando le informazioni di accelerometri, giroscopi e magnetometri (se presenti) con algoritmi di sensor fusion e calcolando la rotazione relativa di due sensori inerziali posizionati rispettivamente prima e dopo il giunto sulla catena cinematica.

Il sistema predisposto dal gruppo TER utilizza sensori "mpu-9250" di Invensense che svolgono calcoli per la determinazione dell'orientazione nello spazio già onboard attraverso tecniche di sensor fusion che permettono di fondere l'informazione dei tre sensori (accelerometro, giroscopio e magnetometro).

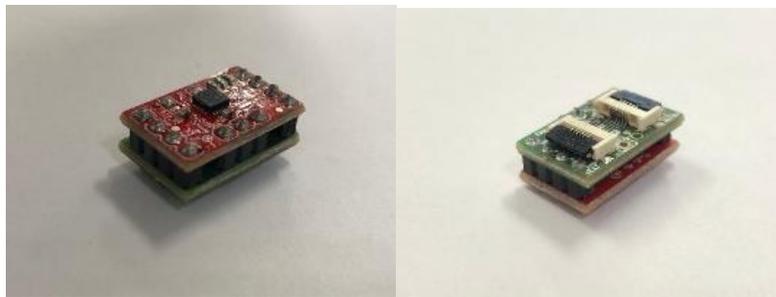
Il sistema è composto da sensori IMU, uno per ogni falange, e un'unità centrale che viene posizionata sul dorso della mano.

Le dimensioni della scheda di collegamento (unità centrale) sono 5,5 cm x 7,4 cm:



*Scheda di collegamento*

Le dimensioni dei sensori sono 3,8 x 2,2 x 0.6 cm:



*Sensori IMU*

## 4. Progettazione e realizzazione dei supporti

In sede di questo lavoro di tesi sono stati affrontati due aspetti principali:

- Trasferimento del sistema da una mano robotica a una mano umana con conseguente creazione del sistema di supporti.
- Utilizzo del software OpenSim per la cinematica inversa.

In questo capitolo viene descritto come è stata affrontata la progettazione di supporti per il guanto sensore.

In particolare si è cercato di creare un sistema il più possibile adatto al campo medico (teleoperazione di sistemi robotici e riabilitazione, in quest ultimo è necessaria una grande precisione per garantire un efficace tracciamento del progresso nella riabilitazione) e allo studio del movimento della mano da applicare nella modellazione di movimenti di mani antropomorfe.

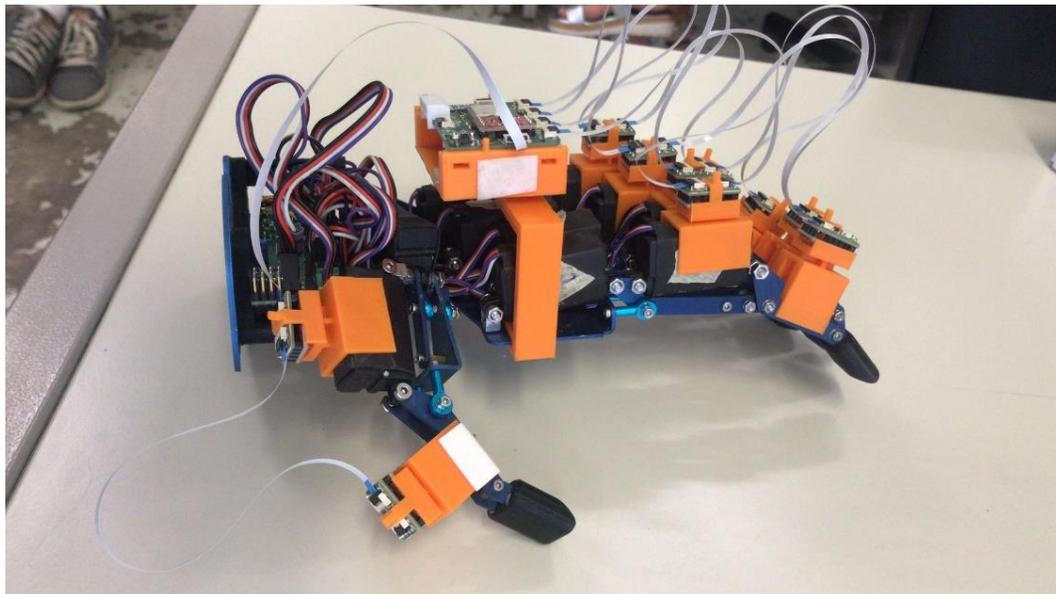
### 4.1 Definizione del problema

La progettazione di un sistema di supporti per i sensori comporta diversi problemi che devono essere risolti o il cui effetto deve essere minimizzato al fine di ottenere risultati accettabili. Per definire i problemi che si presentano con il trasferimento del sistema da una mano robotica a una mano umana è necessario partire dall'utilizzo dei sensori sulla mano antropomorfa.

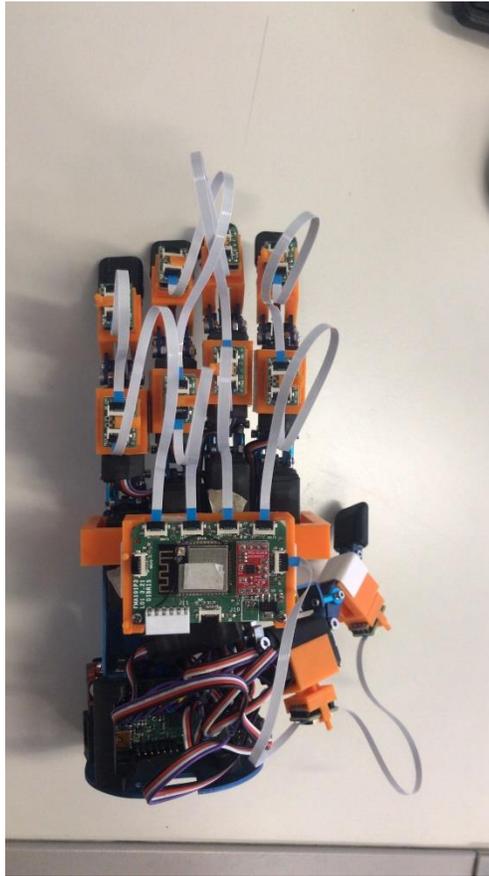
Nelle [Figura 9] e [Figura 10] è rappresentata la mano robotica antropomorfa utilizzata per lo studio sulla manipolazione di oggetti montata su un Cobot (robot collaborativo) chiamato Baxter.

La differenza di funzionamento più grande che si osserva consiste nella rigidità della mano robotica, infatti la mano umana a differenza della mano robotica non presenta soltanto la struttura scheletrica ma anche il tessuto molle (costituito da: muscoli, tendini, grasso ecc.) [15] e l'apparato tegumentario (costituito dalla pelle e dagli annessi cutanei) [16]. Da qui in poi si parlerà dell'unione tra tessuto molle e apparato tegumentario riferendoci soltanto alla pelle.

Durante la misurazione del movimento e la definizione del modello cinematico della mano è necessario rilevare una serie di posizioni della mano, nel fare ciò ci si riferisce al modello cinematico della mano utilizzando la sola struttura scheletrica, mentre la presenza della pelle sulla mano umana introduce un movimento relativo tra la pelle e la struttura ossea durante il movimento generando in questo modo errori nella determinazione della posizione di ciascun segmento (falange). Tale fenomeno è noto come "Soft Tissue Artifact", in alcuni studi il movimento relativo tra pelle e ossa viene stimato in diversi modi, tra cui il tracciamento ottico grazie a MRI. [13]



*Figura 9, sistema di sensori sulla mano antropomorfa utilizzata sul robot collaborativo BAXTER*



*Figura 10, sistema di sensori sulla mano antropomorfa utilizzata sul robot collaborativo BAXTER*

Una soluzione per la creazione di un guanto sensorizzato comunemente utilizzata nel settore di animazione 3D (cinema, videogiochi, effetti speciali) è l'utilizzo di un guanto integro all'interno del quale vengono inseriti i sensori.



*Figura 11, Rokoko MoCap Smartgloves, [17]*

Tuttavia in questi sistemi l'utilizzo di un guanto che presenta una continuità strutturale tra la parte metacarpale della mano e le dita introduce necessariamente movimenti relativi (slittamenti) tra il tessuto del guanto e la mano.

Inoltre data la struttura cinematica della mano, i sensori sono suscettibili a un ulteriore problema di allineamento tra sensore e dito. In letteratura questo è spesso indicato come "Sensor-to-segment calibration" (Calibrazione sensore-segmento) e può essere affrontato con quattro diverse strategie:

- 1) Allineamento presunto: il sensore viene posizionato sul dito, assicurandosi che i due sistemi di riferimento siano allineati.
- 2) Allineamento funzionale: la rotazione tra dito e sensore viene stimata eseguendo una serie di movimenti noti.
- 3) Model Based: la rotazione tra dito e sensore viene stimata partendo dal modello cinematico della mano.
- 4) Dati aumentati: viene utilizzato un sistema esterno per rilevare l'orientamento relativo del sensore rispetto al dito.

Il materiale e la forma dei guanti sono altri fattori che possono influire negativamente sul problema di allineamento. Infatti, il principale svantaggio dell'approccio basato sui guanti è il fatto che non è facilmente adattabile alle esigenze degli utenti finali in quanto questi possono avere mani di diverse dimensioni. Sottovalutare la scelta della taglia e dei

materiali ha effetti negativi sia sull'ergonomia del dispositivo sia sulla sua precisione perché se un guanto è troppo largo può creare spostamenti indesiderati dei sensori durante il movimento e, viceversa, se è troppo stretto può limitare il raggio di movimento delle dita. La forma del guanto non è l'unica soluzione in quanto esistono alcune soluzioni che impiegano esoscheletri sensorizzati o dispositivi che montano i sensori su anelli o ditali ancorati alle dita. Entrambi questi approcci portano vantaggi in termini di stabilità del sensore ma non sono esenti da svantaggi, nel primo caso il compromesso è causato dalle notevoli dimensioni e peso della struttura meccanica e nel secondo dalla scomodità nel disporre gli anelli uno ad uno sulla mano prima di ogni utilizzo.

## 4.2 Altre specifiche

Oltre alla soluzione, o diminuzione degli effetti, dei problemi evidenziati nel corso del lavoro sono state richieste altre specifiche:

- Ergonomia
  - La comodità di utilizzo è richiesta anche per limitare al minimo la diminuzione della capacità di movimento della mano (limitare l'ingombro, limitare la costrizione dei vasi sanguigni, limitare lo sforzo necessario per il movimento della mano con guanto indossato)
  - Dimensione variabile per adattarsi alle mani di diverse dimensioni
- Modularità e flessibilità di utilizzo del sistema
  - Modularità:
    - Ogni componente del sistema deve essere smontabile dal sistema senza influenzarne o limitarne il funzionamento (si deve poter utilizzare i sensori in numero richiesto da una particolare applicazione: se si vuole misurare il movimento del solo indice devo poter montare i sensori sul solo indice senza dover indossare l'intero sistema)
  - Flessibilità:

- Il sistema deve essere adatto all'utilizzo sia sulla mano umana sia sulla mano robotica.

Durante la progettazione è stato inoltre notato un possibile problema di sudorazione che poteva comportare un aumento del fenomeno di slittamento dei componenti del guanto sulla pelle, tale fenomeno tuttavia non si è mai manifestato. Per maggiore sicurezza è stata proposta una soluzione anche a questo possibile problema.

#### 4.4 Prototipazione rapida

Per la realizzazione del dispositivo è stato utilizzato il metodo della Prototipazione Rapida.

La prototipazione rapida è un processo di produzione che consente di creare rapidamente prototipi fisici di prodotti utilizzando software di progettazione assistita da computer (CAD). Questo processo ha rivoluzionato il modo in cui i prodotti vengono sviluppati consentendo un'iterazione più rapida e cicli di sviluppo del prodotto più efficienti.

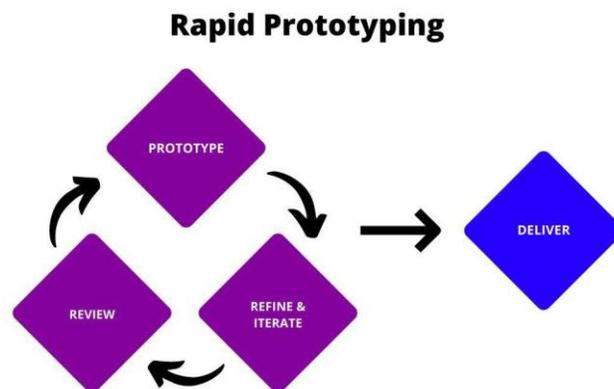


Figura 12, processo di prototipazione rapida

Per la realizzazione delle parti è stato utilizzato il software CAD Autodesk Inventor, un software di modellazione 3D e di progettazione meccanica che incorpora un modulo per la creazione di parti, un modulo per la creazione di assemblaggi delle stesse, e il modulo per la messa in tavola ovvero la realizzazione di un disegno con viste e tutte le quote necessarie per la realizzazione del pezzo. Inventor dà la possibilità di lavorare in diversi ambienti specifici per ogni settore della prototipazione, così come in officina si partirebbe dal pezzo grezzo e lo si lavorerebbe con le varie macchine; è possibile però ottenere anche altri tipi di informazioni, come le analisi di interferenze, gli esplosi, simulazioni di moto e di resistenza dei materiali e degli oggetti, cablaggi e piping 3D.

Ogni parte è stata modellata per essere realizzata tramite stampa 3D con la tecnologia FDM. In generale durante la modellazione e la progettazione di una parte il progettista deve seguire un insieme di regole determinate dalla DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) specifiche per ogni tipo di tecnologia/lavorazione con cui si vuole andare a realizzare la parte. La DFMA riduce i costi e il tempo di immissione sul mercato e produce miglioramenti significativi in termini di qualità e affidabilità. È imperativo considerare sempre i principi DFMA quando si sviluppa un nuovo componente o prodotto. Anche l'analisi dei componenti esistenti per verificare che siano progettati e fabbricati in modo efficiente può produrre risultati considerevoli. Quando si progetta per uno specifico processo o tecnologia di produzione, DFMA si occupa di trasformare le geometrie, i meccanismi e i requisiti delle caratteristiche generati durante il processo di sviluppo del prodotto in qualcosa che possa essere facilmente fabbricato e assemblato attraverso l'uso di macchinari industriali. A un livello più profondo, DFMA viene utilizzato non solo per assicurarsi che una parte possa essere realizzata, ma anche per garantire che la parte possa essere realizzata in modo affidabile secondo le specifiche originali dell'ingegnere, con costi di attrezzaggio ridotti al minimo, costi delle parti bassi, velocità di ciclo elevate, e tassi di scarto insignificanti. In pratica, ciò implica che il processo DFMA è spesso una sorta di negoziazione tra l'intento progettuale e gli aspetti pratici della realizzazione di prodotti su larga scala in modo conveniente. [18]

I seguenti cinque fattori dovrebbero essere presi in considerazione nel processo di progettazione:

- Processo: scegli i processi di produzione corretti, in quanto controlleranno la direzione del design.
- Design: aderire alle linee guida di progettazione dei processi di produzione principali scelti.
- Materiale: progettare le parti nel rispetto del materiale scelto poiché materiali diversi hanno requisiti di produzione diversi.
- Test: progettare la parte per consentire una facile ispezione e test.

[18]

Nel nostro caso poiché lo scopo del lavoro è quello di realizzare un design standardizzato, facilmente riproducibile e soprattutto economico è stata selezionata la stampa 3D FDM come processo di produzione in quanto inoltre indispensabile per una prototipazione rapida delle parti. Poiché le parti realizzate hanno una funzione e geometria semplici non sono stati necessari test particolari, si sono testate solamente le varie feature necessarie per il funzionamento del guanto (fori, curvature, zigrinatura, misure). Non ci sono state particolari specifiche per quanto riguarda il materiale per tale motivo si è utilizzato il classico PLA (Acido PoliLattico) più comunemente utilizzato per la tecnologia FDM. Si sono effettuate prove utilizzando il materiale TPU (Thermoplastic Polyurethane) che è caratterizzato da un'elevata elasticità e può essere stampato da alcuni tipi di stampanti FDM. Si è cercato di realizzare le parti in TPU per cercare di conferirgli elasticità per migliorarne l'aderenza alla pelle e l'ergonomia. Tuttavia queste prove non hanno prodotto risultati differenti dal PLA per cui si è deciso di utilizzare il PLA poiché è più diffuso come materiale per stampa 3D FDM. Quindi si sono seguite tutte le tecniche DFMA relative a questa tecnologia. In particolare la progettazione di un oggetto che dovrà essere realizzato attraverso Additive Manufacturing richiede che siano presi in considerazione i seguenti aspetti:

- Evitare materiale superfluo
- Minimizzare i supporti
- Tolleranze

- Fori ad asse orizzontale o verticale
- Sbalzi
- Angoli e deformazioni
- Qualità superficiale
- Anisotropia e direzioni di stampa
- Ritiri

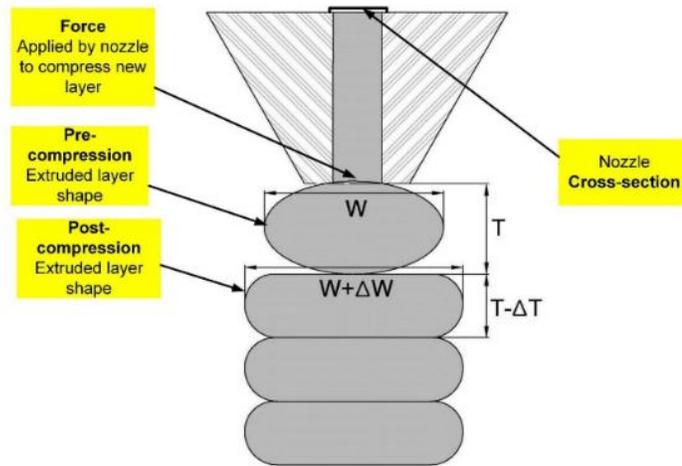


Figura 13, effetto della deposizione degli strati, fenomeno importante per tolleranze e fori. [19]

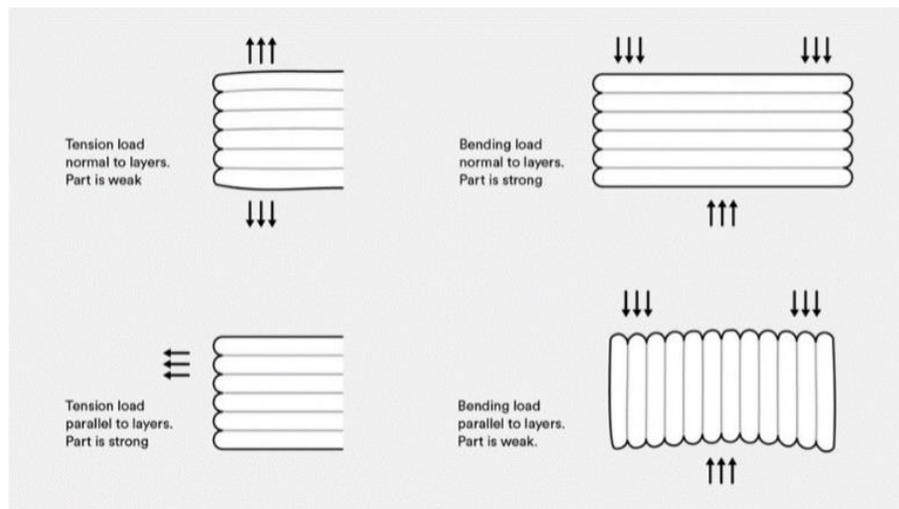


Figura 14, effetto dei carichi in funzione della disposizione degli strati. Questo sottolinea l'importanza delle direzioni di stampa e dell'anisotropia dei pezzi realizzati tramite AM. [20]

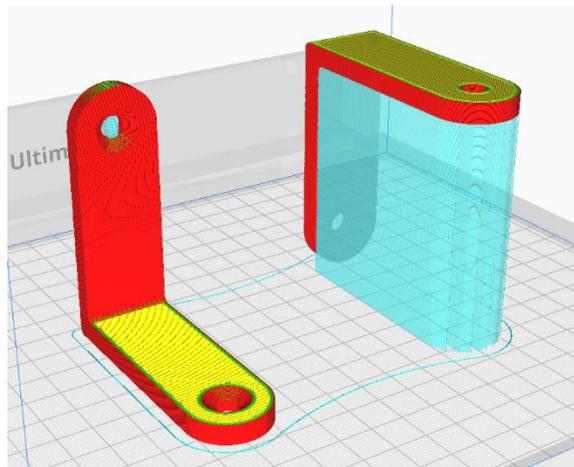


Figura 15, importanza dell'orientamento di stampa per la minimizzazione del materiale di supporto [21]

## 4.5 Ideazione e sviluppo

Per la realizzazione dei supporti per i sensori, considerate tutte le specifiche e le problematiche sopra descritte, è stata necessaria l'ideazione di un guanto che non avesse continuità strutturale tra le dita e il metacarpo. Per questo motivo sin dai primi prototipi sviluppati la soluzione che è stata adottata è quella di un guanto che aderisce alla sola parte del metacarpo fermandosi alle articolazioni MCP (meta-carpo-falangee) per fissare l'unità centrale al dorso della mano, e anelli con sede per i sensori IMU per le falangi prossimale e intermedia di ogni dito. Tale soluzione presenta un ottimo compromesso tra la minimizzazione dei problemi di slittamento pelle-guanto e la comodità di utilizzo (ogni utilizzo prevede la ricollocazione degli anelli sulle dita). Inoltre, come detto precedentemente, è stato osservato che la flessione e l'estensione delle dita (chiusura e apertura della mano) non deve incontrare resistenze particolari in quanto potrebbe alterare i risultati del monitoraggio dei movimenti, soprattutto in soggetti con motricità fine limitata (per esempio post-ictus [22]).

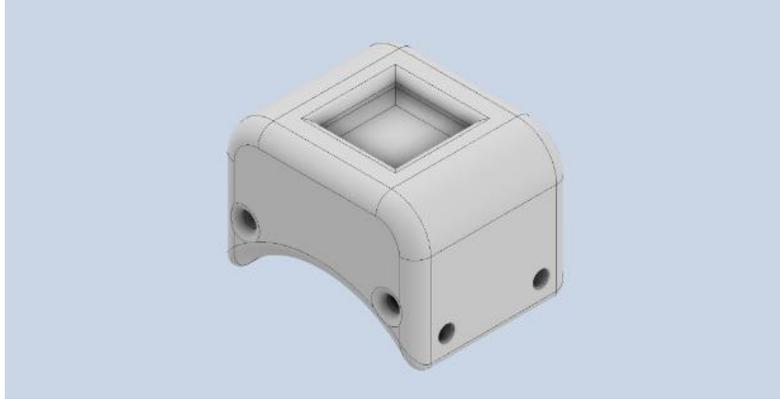
Per motricità fine si intendono le abilità motorie che comprendono il controllo e la coordinazione della muscolatura distale delle mani e dei piedi. [23]

#### **4.5.1 Anelli e supporti per sensori IMU. Processo di ideazione step-by-step.**

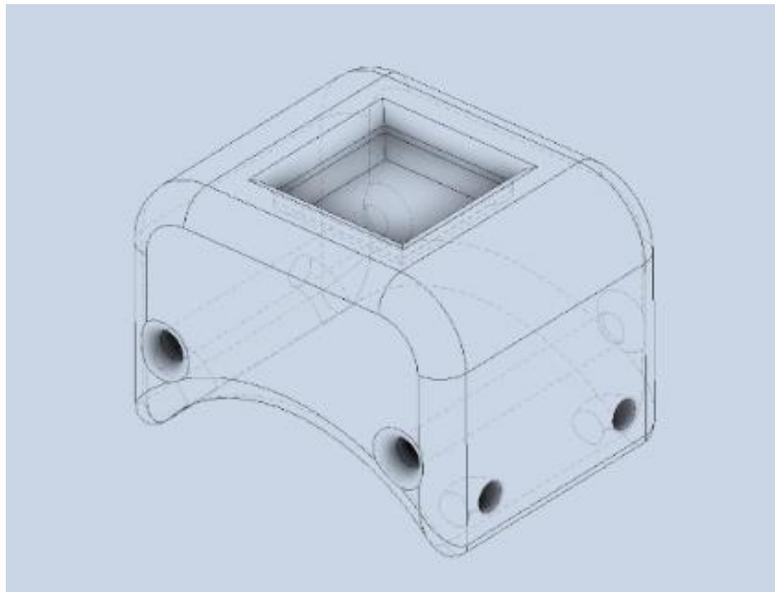
Lo sviluppo del lavoro di prototipazione ha evidenziato che la parte di più complicata ideazione è stato il supporto per i sensori IMU. In particolare questa parte doveva essere modellata in modo tale da presentare una sede per l'inserimento del sensore e una parte di fissaggio al dito.

Il primo modello sviluppato è un modello di prova, necessario per concretizzare le idee che sono state seguite per la realizzazione del guanto. Sul supporto sono presenti:

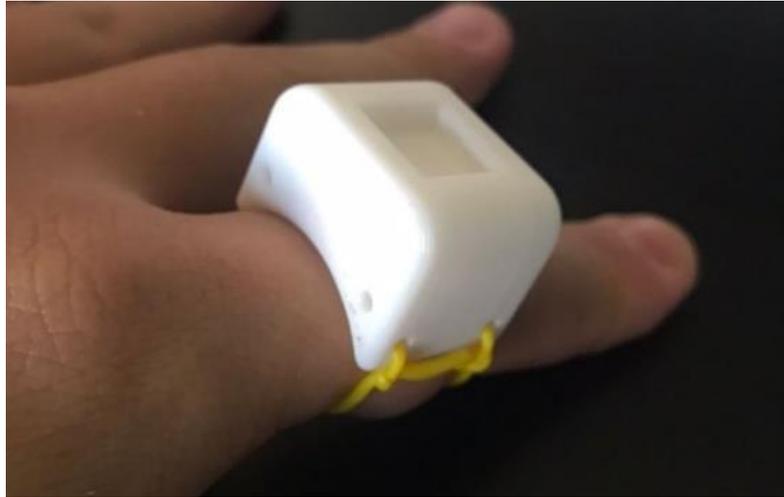
- Sede per il sensore IMU
- Sagoma del dito
- Fori laterali (curvilinei, *Figura 17*) per l'inserimento di elastici per il fissaggio al dito
- Fori frontali



*Figure 16, modello dimostrativo, dettaglio CAD*



*Figura 17, vista con spigoli nascosti*



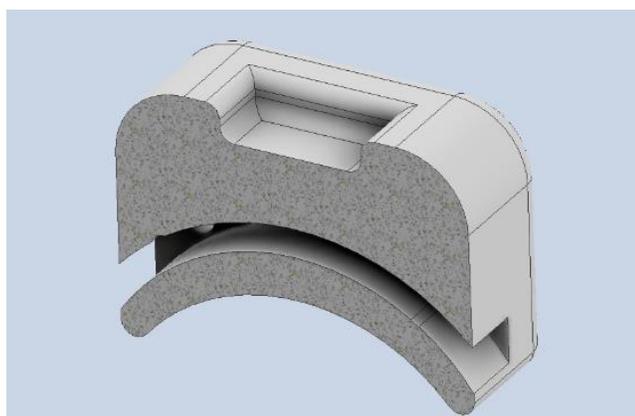
*Figura 18, modello dimostrativo realizzato con stampa 3D*

In particolare i fori frontali sono stati realizzati con l'intento di conferire una qualche continuità strutturale al guanto senza tuttavia compromettere il movimento della mano. Tale aspetto verrà trattato successivamente.

Per la realizzazione del fissaggio al dito sono stati presi in considerazione due approcci: a elastico di gomma classico come in *Figura 18*, e con elastico a fascia in poliestere come in *Figura 19*. La differenza nella modellazione consiste nella realizzazione della sede dell'elastico. Mentre nel primo caso la sede era realizzata praticando fori circolari in prossimità degli spigoli, nel secondo caso la sede è stata ricavata realizzando una sezione ad anello vuota all'interno del supporto (*Figura 20*).



*Figura 19, modello 2*

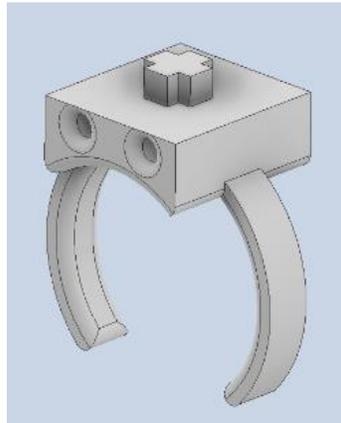


*Figura 20, modello 2, vista in semisezione*

Tali modelli sono stati realizzati ai soli fini dimostrativi e presentano dimensioni e caratteristiche non adatte all'utilizzo finale.

Un altro interessante approccio che è stato preso in considerazione è quello della realizzazione di anelli senza l'utilizzo di elastici per il fissaggio alle dita. Questa

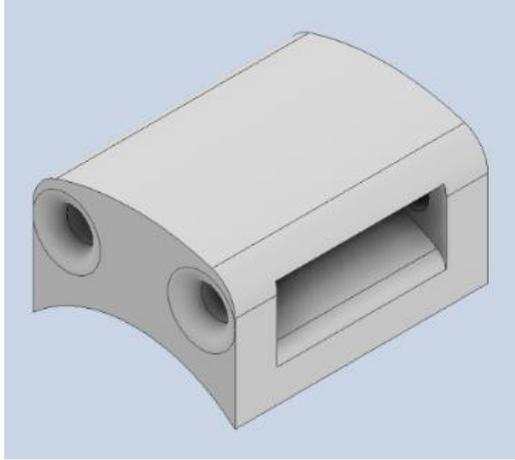
soluzione tuttavia non ha mostrato risultati promettenti per una serie di problemi come non possibilità di adattare il supporto a misure del dito diverse, e l'ingombro che si andava a creare tra un dito e l'altro a causa dello spessore dell'anello con la conseguente diminuzione della mobilità e dell'ergonomia dell'intero dispositivo. Inoltre su questo prototipo si è aggiunta un'ulteriore parte. Al posto di una sede per il sensore si è inserito un incastro a croce che si va a inserire dentro a un supporto separato per il sensore che presenta una sede di incastro.



*Figura 21, modello ad anello*

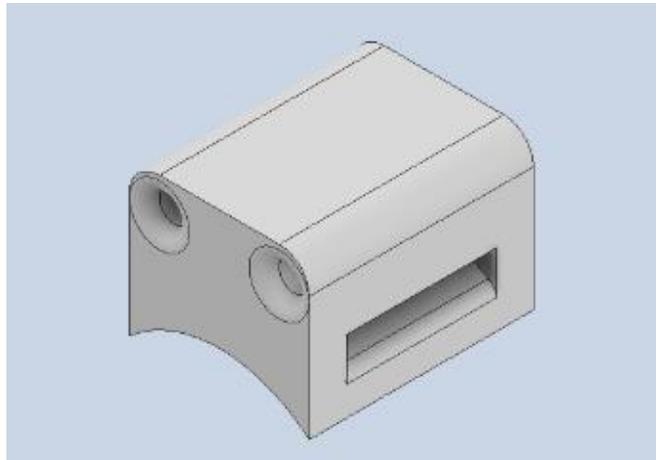
Dopo la conclusione che il modello 2 è la soluzione potenzialmente migliore si è portata avanti tale idea sviluppandola e migliorandola sotto tutti i punti di vista.

La prima modifica che si è cercato di fare è la dimensione corretta che permettesse di posizionare i sensori e di indossare il supporto in maniera tale da avere il minimo ingombro. A tale scopo è stato sviluppato il seguente modello:



*Figura 22, modello 3*

e poi:



*Figura 23, modello 3.1*

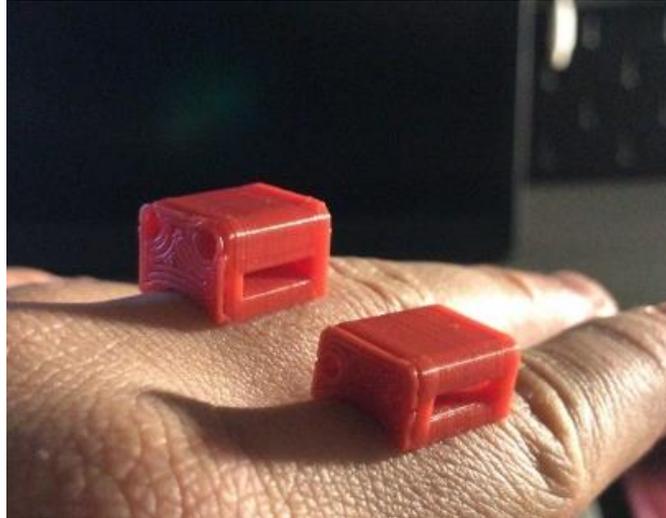


Figura 24, modelli 3 e 3.1

Tali modelli presentano dimensioni migliori sia per l'ingombro sia per il posizionamento del sensore. Tuttavia in questo caso non è ancora presente una sede o un attacco per il sensore. Inoltre i due modelli sono stati realizzati, oltre per provare le dimensioni corrette, con lo scopo di evidenziare la differenza di posizionamento dei fori longitudinali. In un caso (*Figura 22*) i fori vengono posizionati in basso in maniera tale da intersecare il foro laterale riducendo in questo modo l'ingombro, allo stesso tempo tuttavia tale soluzione comporta maggiori difficoltà durante l'inserimento degli elastici. Al contrario il secondo modello presenta leggermente maggiori dimensioni per consentire un assemblaggio più comodo.

Una volta stabilita la soluzione adatta per la disposizione degli elastici di tenuta si è passato a studiare una soluzione adatta per il posizionamento del sensore.

Tra le specifiche richieste per il progetto si evidenzia in questo caso la modularità del sistema. In particolare la soluzione ottimale è quella che permetta un utilizzo del sensore sia sulla mano umana sia su una mano robotica con una rimozione e posizionamento del sensore facile e veloce. Per tale motivo la soluzione migliore tra quelle considerate è la creazione di un supporto all'interno del quale il sensore si vada a inserire in maniera

semi-permanente e che si vada a collegare all'anello sul dito. In questo modo si definiscono due parti per il contenimento del sensore:

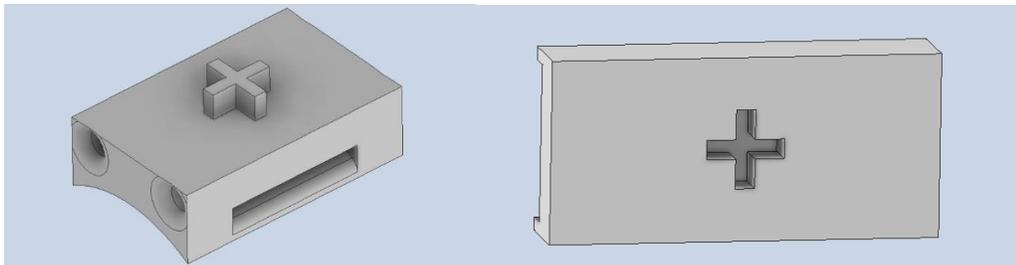
- Anello – la parte del guanto direttamente a contatto con la mano, è il componente che abbiamo descritto finora
- Supporto del sensore – un componente che non fa direttamente parte del guanto ma che ha lo scopo di contenere il sensore e di garantire la modularità di utilizzo

A questo punto i problemi da affrontare sono due:

- 1) Collegamento tra anello e supporto del sensore
- 2) Contenimento del sensore sul supporto

In tal caso le soluzioni proposte erano di diverso tipo tra cui evidenziamo solo alcune.

La prima soluzione consiste nella creazione di un collegamento forzato smontabile a forma di croce per collegare le due parti, e di un gancio di tenuta per il posizionamento del sensore.



*Figura 25, collegamento a croce*

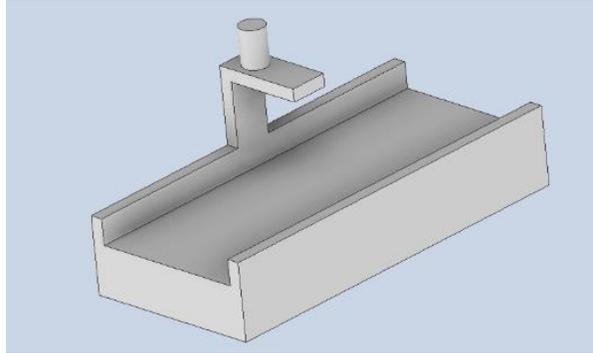


Figura 26, gancio di tenuta per il sensore

La forma a croce del collegamento tra le due parti risulta essere particolarmente efficiente in quanto permette di minimizzare il materiale utilizzato e permette di distribuire gli sforzi in maniera tale da ottimizzare la distribuzione delle sollecitazioni.

Sul supporto è stato realizzato un gancio che sfrutta la geometria del sensore per la sua tenuta sul posto. Il gancio garantisce una buona tenuta e permette di inserire e rimuovere il sensore con facilità, tuttavia pur avendo una buona flessibilità, dai risultati delle prove fatte su un pezzo stampato in 3D disponendo gli strati di materiale perpendicolarmente alla sezione più sollecitata (la base), risulta poco resistente e tende a rompersi dopo pochi cicli di utilizzo oppure con degli sforzi relativamente bassi. Per ovviare a questo problema si è considerato tale gancio come una trave a sbalzo caricata sull'estremo libero con un carico  $P$ . In *Fig. 27 - 29* è rappresentato lo schema di un elemento di montaggio a incastro detto “Snap-fit” a sbalzo. (Utilizziamo lo schema di uno snap-fit a sbalzo poiché ha un comportamento identico a una trave a sbalzo, e inoltre faremo riferimento alle *Fig. 27 – 29* anche per la descrizione di un'altra soluzione per il posizionamento dei sensori.)

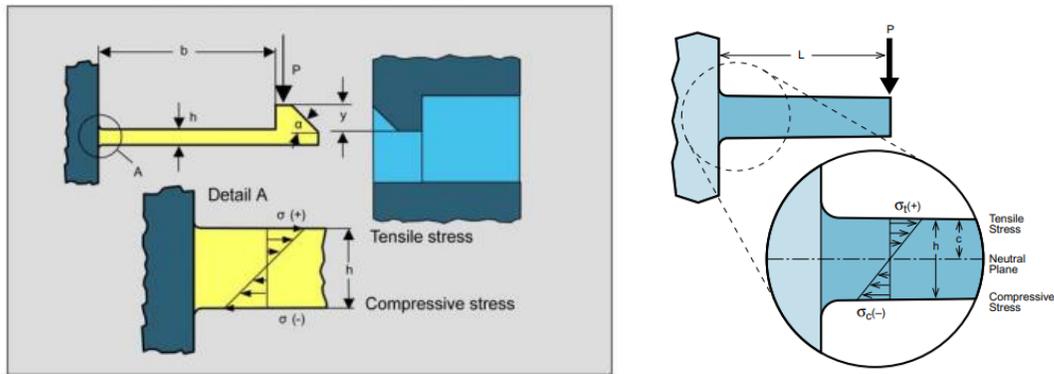


Figura 27, snap-fit [24] e trave a sbalzo [25]

La flessione dovuta alla sollecitazione di taglio P induce sollecitazioni sia di trazione sia di compressione nella sezione trasversale. Il piano neutro definisce il piano di sollecitazione nulla in cui la sollecitazione passa da trazione a compressione [25]. In questo modo si ha una distribuzione di sollecitazione lineare a farfalla definita dalla formula:

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y$$

dove  $\sigma$  rappresenta la tensione che si crea nella direzione longitudinale a causa dell'azione del carico P;  $M_x$  rappresenta il momento flettente che nasce per effetto dell'azione del carico P;  $y$  rappresenta la coordinata lungo lo spessore  $h$  della trave.

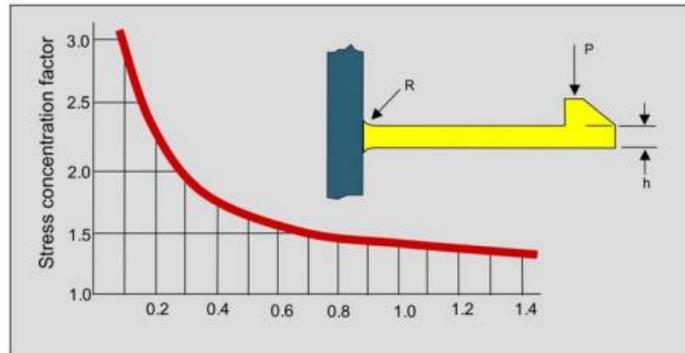


Figura 28, effetto del raggio di raccordo sulla concentrazione delle tensioni, [24]

Introducendo il fattore di concentrazione delle tensioni la *Figura 28* riporta l'andamento della concentrazione delle tensioni in prossimità della radice all'aumentare del raggio di raccordo alla base.

In generale si suggerisce di modellare lo snap-fit in modo che il suo spessore ( $h$ ) o la sua larghezza ( $b$ ) si assottiglino dalla radice all'estremo libero; in questo modo la sezione trasversale portante assume in ogni punto un valore più appropriato del carico locale. La sollecitazione massima sul materiale può quindi essere ridotta e di conseguenza è necessario meno materiale. Buoni risultati sono stati ottenuti riducendo linearmente lo spessore ( $h$ ) dello snap-fit, in questo modo il suo valore all'estremo libero è uguale alla metà del valore alla radice. Con i disegni illustrati nelle *Fig. 27-29*, la sezione trasversale vulnerabile è sempre alla radice. Occorre quindi prestare particolare attenzione a quest'area per evitare la concentrazione dello stress. [24]

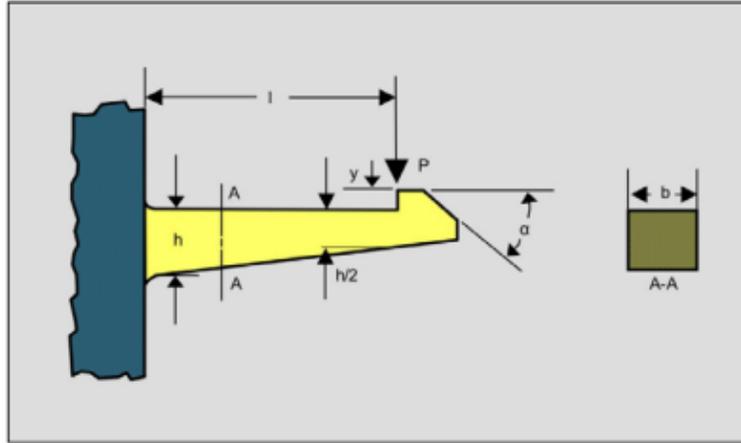


Figura 29, snap fit con rastremazione di tutte le grandezze fino a 0.5 nella direzione longitudinale dalla base fino all'estremo libero. [24]

Per tale motivo il modello precedente è stato modificato seguendo le linee guida appena evidenziate:

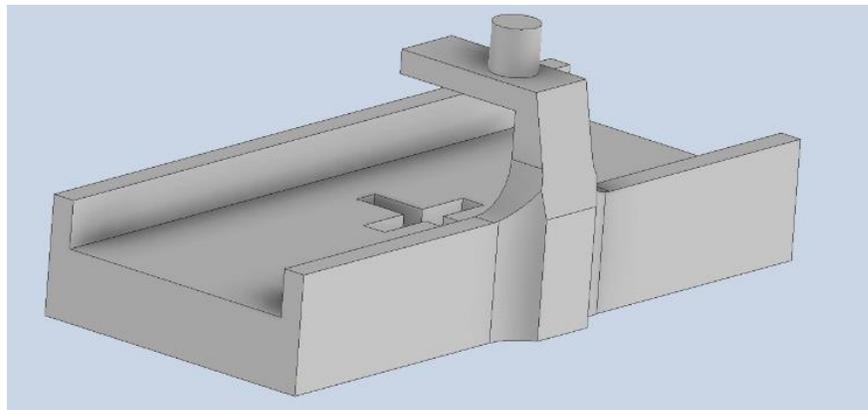
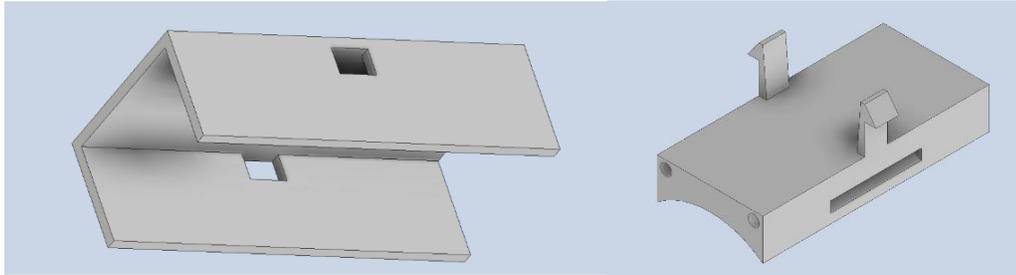


Figura 30, supporto per il sensore con gancio di tenuta modificato.

Un'altra soluzione proposta consiste nell'inserimento di snap-fit di tenuta per il posizionamento di un coperchio. Il coperchio inizialmente era stato pensato per introdurre anche un miglioramento dal punto di vista estetico dell'intero sistema. Tuttavia tale

soluzione è stata considerata poco funzionale in quanto non rispettava tutte le specifiche delineate.

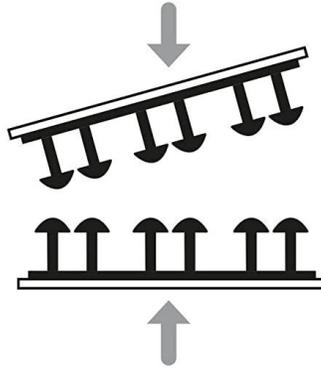


*Figura 31, snap-fit e coperchio*

Il presente progetto di tesi, come evidenziato nei primi capitoli, ha lo scopo di creare un dispositivo che possa essere realizzato da chiunque sia in possesso di una stampante 3D. Di conseguenza a causa della precisione di stampa variabile in base alle varie macchine e alle varie condizioni di utilizzo (ambientali, stato della stampante, stato del materiale) si è cercato di produrre un modello con parti di precisione ridotte al minimo. Quindi si è scartata l'idea di un collegamento a incastro tra il supporto del sensore e l'anello per eliminare l'aleatorietà dovuta alle imprecisioni di stampa.

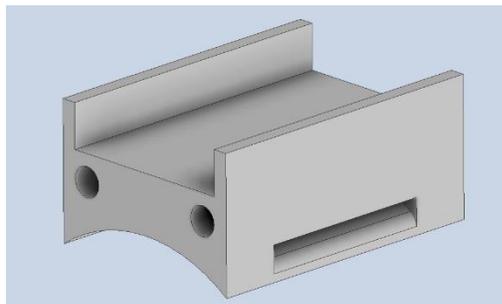
Tenendo a mente queste considerazioni si è individuata come ottimale la soluzione che sfrutta un sistema di fissaggio tipo 3M Dual Lock. Le teste a forma di fungo ad incastro del 3M™ Dual Lock™ restano bloccate. Si chiudono con uno scatto udibile per assicurare che il design sia fissato saldamente. Il supporto adesivo sensibile alla pressione fornisce legami forti e durevoli con metalli (alluminio, acciaio inossidabile), vetro, plastica (acrilico, policarbonato, ABS) e vernici. Chiusura richiudibile resistente, affidabile e semplice da usare per la sostituzione di viti, chiodi, bottoni automatici e rivetti. Si lega a una varietà di substrati tra cui metalli e materie plastiche come acrilici, policarbonato e ABS. Adatto per uso interno ed esterno. Resistenza alla trazione 5 volte superiore ai sistemi di fissaggio hook and loop tradizionali. Durata - fino a 1000

aperture e chiusure prima di perdere il 50% dell'originale resistenza alla trazione.  
Resistente all'umidità e ai raggi UV. [26]



*Figura 32, principio di funzionamento del sistema di fissaggio Dual Lock, [26]*

Di conseguenza i modelli che sono stati sviluppati sono caratterizzati da semplici superfici di appoggio su cui si va a posizionare il sistema di fissaggio. L'anello presenta inoltre delle pareti laterali che hanno la funzione di creare una sede per il sensore in modo tale da allinearlo lungo la falange del dito. Dunque sia sul supporto sia sull'anello viene incollato il Dual Lock, ciò permette di ottenere una rapida e semplice rimozione e posizionamento dei sensori.

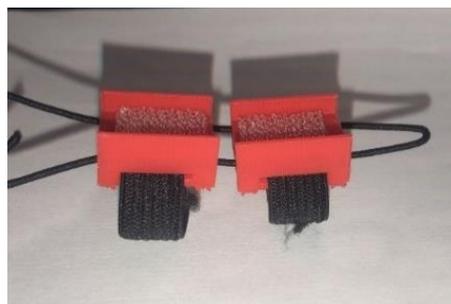
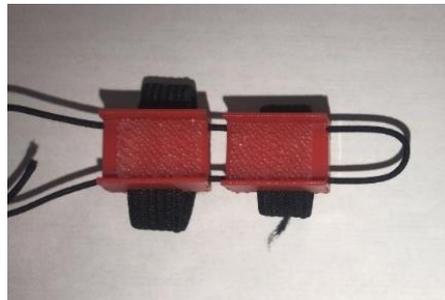


*Figura 33, anello con sede per il supporto del sensore*

A questo punto, lasciando la descrizione del supporto del sensore per ultima, passiamo a descrivere il primo prototipo del guanto.

In questa fase del lavoro l'idea era quella di creare un guanto unico che avesse una qualche forma di continuità strutturale per facilitarne l'utilizzo. Questa considerazione spiega la creazione dei fori longitudinali che servono per l'inserimento di fili o elastici a filo che permetterebbero di tenere insieme l'intera struttura senza dover avere un guanto completo.

Il fissaggio dell'anello al dito in questo prototipo è stato creato utilizzando un elastico da cucito in Nylon-Spandex (Nylon è il nome commerciale per indicare la famiglia di poliammidi sintetiche. Spandex è il nome commerciale, in Italia noto anche come elastam, che indica una fibra sintetica di poliuretano utilizzata per elasticizzare i tessuti). Un anello in questo tessuto permette di adattarne la dimensione a dita di taglia diversa. In particolare per la realizzazione degli anelli si è presa una dimensione diversa per ogni falange in quanto la circonferenza delle dita di una persona varia in base al dito e in base alla falange del dito. Dopo avere ritagliato il materiale ogni striscia è stata inserita nel foro laterale e cucita alle due estremità. Per ogni dito inoltre è stato richiesto di sensorizzare solo le falangi intermedia e prossimale.

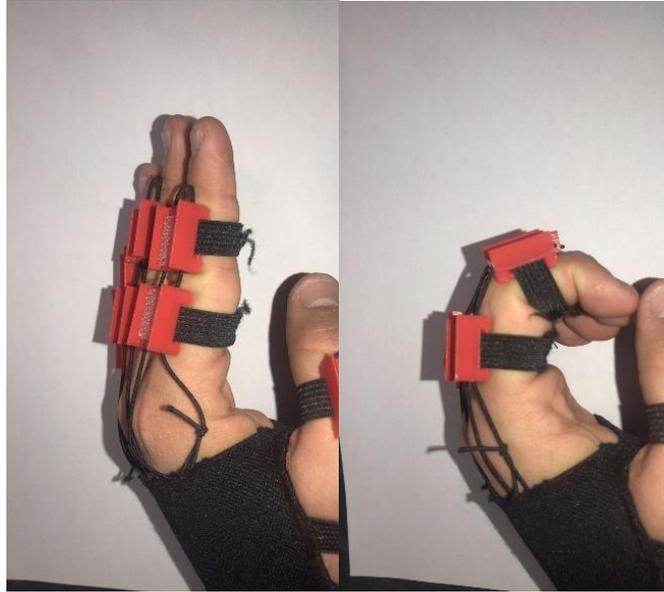


*Figura 34, anelli con elastico e filo di connessione*

Ciascun dito (*Figura 34*) doveva quindi essere collegato al metacarpo della mano. Per questo aspetto si è pensato di utilizzare comunque un guanto per l'estrema facilità di utilizzo. Tuttavia a questo punto era necessaria solo la parte dorsale del guanto per garantire il fissaggio della scheda principale che mette in comunicazione tutti i sensori. Come soluzione ottimale si è selezionata quella di utilizzare un guanto che pur avendo soltanto la parte dorsale presentasse una buona aderenza alla mano. Queste caratteristiche sono presenti nei tutori da polso che essendo realizzati in materiale elastico permettono una buona aderenza senza avere il vincolo delle dita. Quindi come soluzione finale per il fissaggio dell'unità centrale al dorso per tutti i prototipi è stato utilizzato un guanto di supporto per polso e pollice senza dita realizzato in Nylon-Spandex come gli elastici degli anelli.



*Figura 35, primo prototipo*



*Figura 36, primo prototipo, movimento delle dita*

Pur essendo promettente il primo prototipo presentava il seguente difetto: l'impossibilità di sconnessione di ogni singolo anello per sperimentazioni sulle dita singole – non si ha modularità di utilizzo. Dopo aver considerato alcune soluzioni per cercare di rendere ciascun anello separabile dal resto del guanto si è concluso che la soluzione più semplice è eliminare la connessione tra ogni anello in modo tale da avere anelli separati che si vanno a posizionare sulla mano uno ad uno.

Una volta stabilita la struttura del guanto i problemi da affrontare rimanenti erano relativi a:

- vestibilità
- gli slittamenti presenti tra la pelle delle dita e gli anelli del guanto.

Per quanto riguarda la vestibilità si è evidenziato che creare un anello elastico di misura fissa a riposo pur permettendo l'adattamento a dita di diverse dimensioni comporta dei problemi agli estremi:

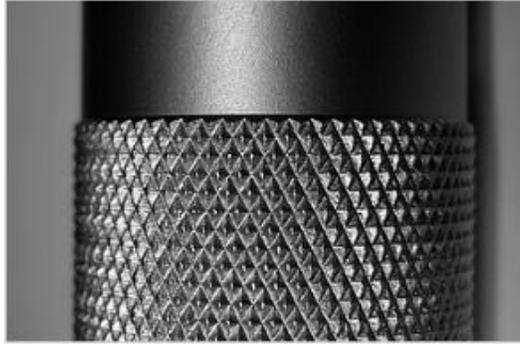
- se il dito è troppo piccolo si crea del gioco tra l'anello e il dito e si hanno slittamenti
- se il dito è troppo grande l'elastico tende a stringere troppo la mano e quindi a limitare i movimenti.

per tale motivo si è deciso di creare un anello a chiusura regolabile grazie all'applicazione del Dual Lock sull'elastico. In questo modo si riesce ad avere anelli tutti della stessa misura non solo per mani di dimensioni diverse ma anche per ogni dito e ogni falange di ogni dito, quindi si standardizzano le dimensioni dell'anello favorendo in questo modo la riproducibilità del sistema di anelli.

Uno dei grossi problemi che si è cercato di affrontare è quello degli slittamenti che si creano tra gli anelli e la pelle durante il movimento delle dita. Per affrontare tale problema innanzitutto è necessario introdurre un maggiore attrito tra la superficie curva dell'anello a contatto con la pelle delle dita e la pelle stessa. Come è ben noto l'attrito non è altro che l'effetto che si crea durante il contatto tra due superfici ciascuna con un determinato grado di ruvidità. In particolare in questo caso abbiamo le due superfici sopra citate che entrano in contatto, e per riuscire ad aumentare l'aderenza tra queste due superfici si deve necessariamente agire sulla superficie dell'anello. Per approfondimenti per quanto riguarda il tema della tribologia si rimanda a [27].

[28] Nella modellazione delle superfici a contatto con la pelle umana la tecnica più comune è quella dell'introduzione della zigrinatura. La zigrinatura è il risultato della lavorazione detta godronatura in cui una superficie a rilievo viene ottenuta tramite il passaggio a pressione di rulli scanalati sulla superficie dapprima liscia di un pezzo cilindrico (direzione radiale). La pressione dei rilievi dei rulli schiaccia il metallo del pezzo e lo fa risalire negli incavi delle scanalature; questa operazione viene tecnicamente richiesta per una esteticità del pezzo e per una migliore impugnatura. La zigrinatura per godronatura non influisce sulle potenzialità dell'oggetto di per sé, ma consente d'avere

- Impugnatura migliore permette alla pelle umana d'avere un maggiore attrito nella presa, che sulla superficie liscia risulterebbe meno salda e di avere così maggiore controllo del pezzo durante l'uso.
- Estetico può assumere valore estetico [28]

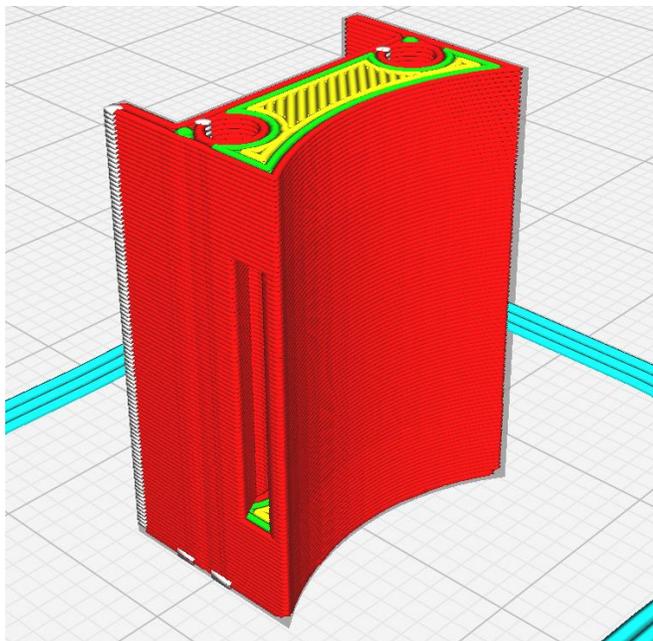


*Figura 37, zigrinatura su un oggetto cilindrico, [28]*

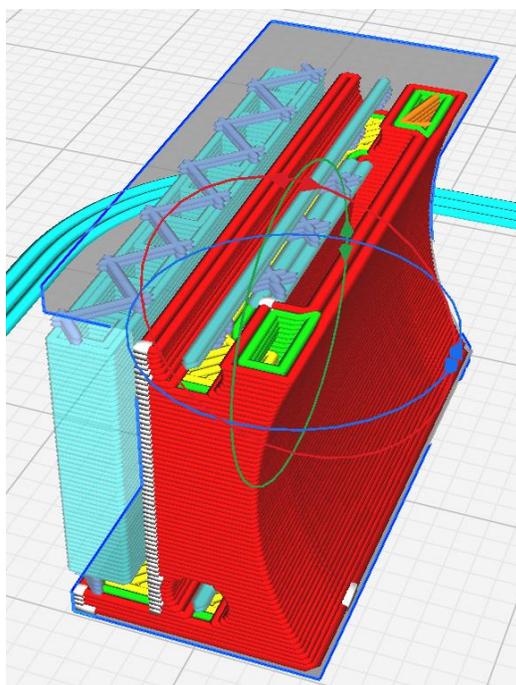
[28] Esistono diversi tipi di zigrinatura tra cui:

- A linee parallele alla direzione longitudinale dell'utensile, consente un migliore contatto durante la rotazione
- A linee ortogonali alla direzione longitudinale dell'utensile, utile per spingere o tirare l'utensile nella direzione dell'asse
- A diamante o a linee incrociate, combinazione delle due precedenti, è la soluzione più comune

In particolare durante la stampa degli anelli per la natura stessa della tecnologia FDM si è osservato che le prime due soluzioni si creano in automatico senza la necessità di modificare il profilo dell'anello.



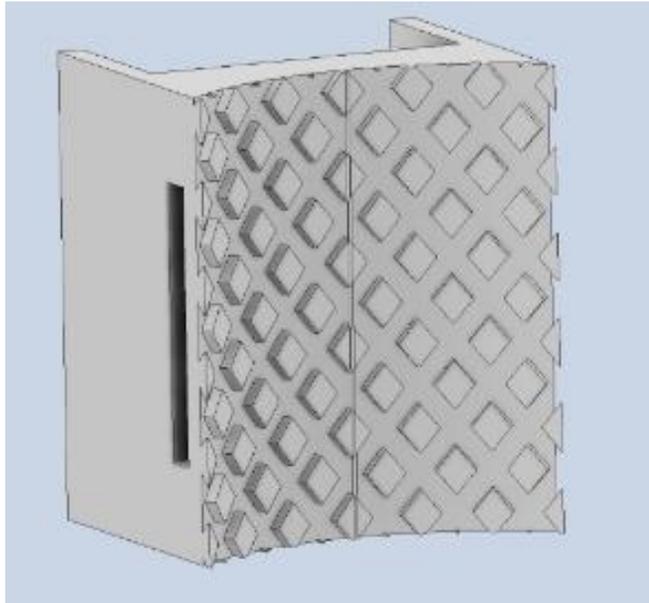
*Figura 38, slicing e posizionamento ottimale dell'anello sul piatto di stampa, linee ortogonali alla direzione longitudinale.*



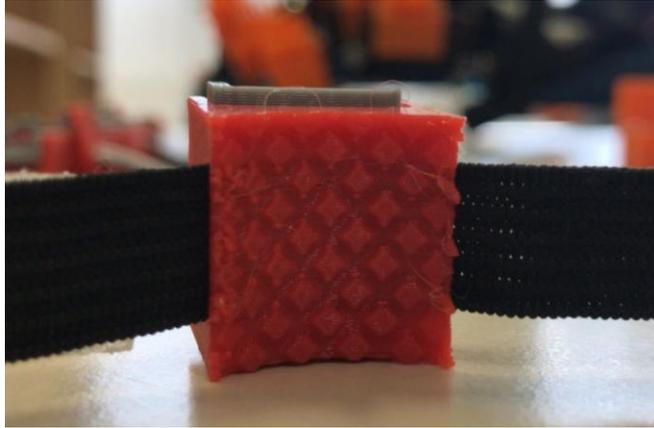
*Figura 39, slicing e posizionamento non ottimale sul piatto di stampa, linee parallele alla direzione longitudinale*

In particolare nelle *Fig. 38-39* è mostrato il processo di slicing per la generazione del g-code per la stampa. Si nota come la deposizione di strati successivi crea delle scanalature sul profilo dell'anello, questo permette di creare linee ortogonali (*Figura 28*) o parallele (*Figura 39*) alla direzione longitudinale. La prima soluzione consente di avere una zigrinatura che garantisce una buona resistenza nei confronti degli slittamenti longitudinali ma lascia libero il movimento laterale (circonferenziale), la seconda soluzione il contrario.

Per tale motivo è stata necessaria la creazione di una zigrinatura a diamante, che è la combinazione delle prime due soluzioni, sulla superficie interessata:

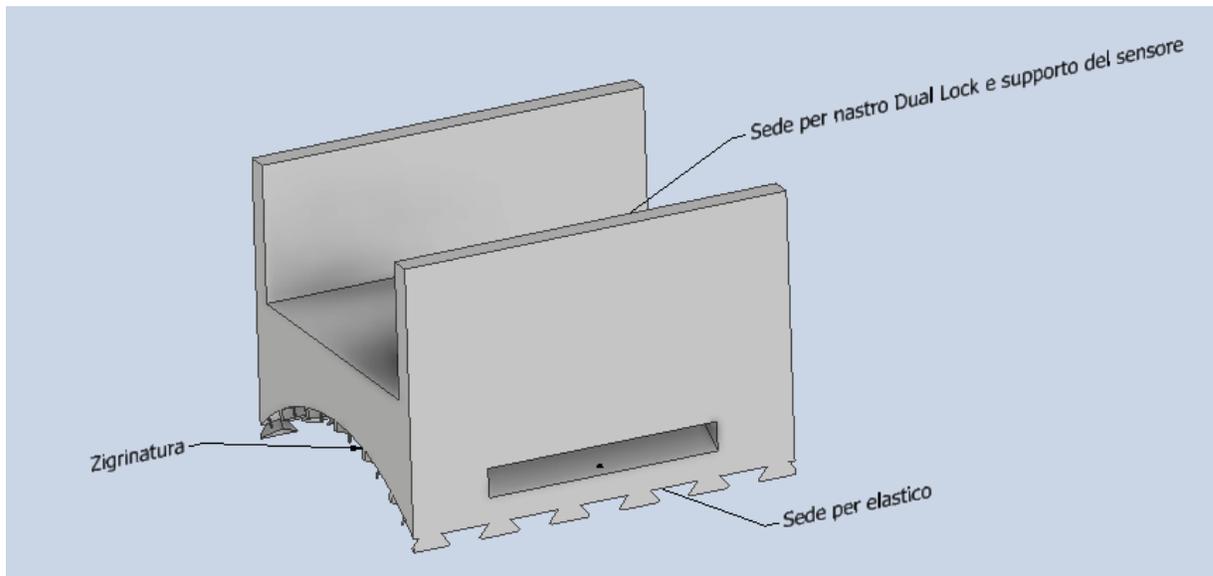


*Figura 40a, zigrinatura*



*Figura 40b, zigriunatura su un anello finito*

Con l'introduzione della zigrinatura sugli anelli si è quindi arrivati al modello definitivo utilizzato nella creazione del guanto.



*Figura 41, modello finale dell'anello*

Dopo la creazione dell'anello ci rimane discutere la modellazione dei supporti per i sensori e per l'unità centrale.

Per la creazione del supporto si è sfruttata la geometria del sensore. Utilizzando due spazi presenti sulla superficie laterale dei sensori si sono creati due ganci (seguendo le regole delineate precedentemente) che permettono di mantenere in posizione i sensori.

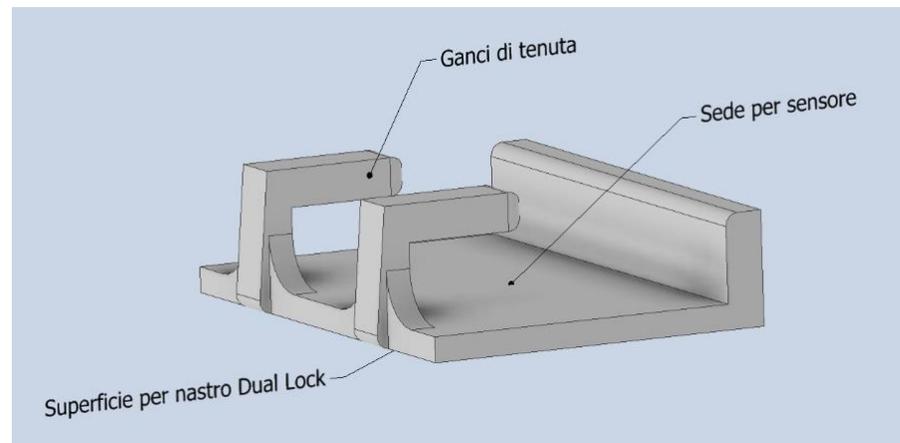


Figura 42, supporto finale

Inserendo il sensore all'interno e fissando il nastro Dual Lock sulla parte bassa del sensore si crea un'unità che può essere facilmente utilizzata sia sul guanto sia, per esempio, sulla mano antropomorfa del robot.

L'assemblaggio tra le due parti avviene incastrando il supporto del sensore nella sede presente sull'anello e unendo le due superfici con il nastro Dual Lock.

Per ultimo è stato affrontato il supporto per l'unità centrale. Come posizione ottimale è stato scelto il dorso della mano. Nella creazione del supporto è stato tenuto in conto che l'unità centrale:

- presenta le porte per i cavi flat per il collegamento dei sensori
- viene collegata a una batteria esterna da 3.7v (Figura 43)
- Presenta dei fori per viti M2
- deve anche essa poter essere scollegata dal guanto e posizionata sulla mano del robot.



Figura 43, batteria 3.7 V

di conseguenza tale supporto è stato scomposto in due parti:

- la prima parte viene creata per essere integrale al guanto, e per maggiore ergonomia tale parte è stata sagomata per seguire la curvatura del dorso della mano in linea di massima. Per effettuare le misurazioni per la creazione della curvatura si sono individuati sul dorso della mano dei “punti fermi” ossia punti che, approssimativamente, non cambiano la propria posizione durante il movimento della mano.



Figura 44, individuazione dei "punti fermi"

Tali punti formano un triangolo sul dorso della mano sul quale la curvatura che si crea chiudendo e aprendo la mano è trascurabile, mentre ai lati di tale triangolo durante il movimento della mano si ha una curvatura molto accentuata. In questo modo si evidenziano due posizioni, la posizione di mano aperta e la posizione di

mano chiusa. In ogni posizione si crea quindi una forma approssimabile con un triangolo dal quale si possono ricavare il segmento orizzontale e il segmento verticale necessari per il dimensionamento del profilo. In totale si generano quattro forme approssimabili con dei triangoli, a partire da tali forme e utilizzando il comando *Loft* è stato possibile generare le curvature.

Prendendo in considerazione questi aspetti si è creato il supporto che approssimativamente segue l'andamento della curvatura della mano. Tale approssimazione è dovuta alle differenti forme delle mani delle persone.

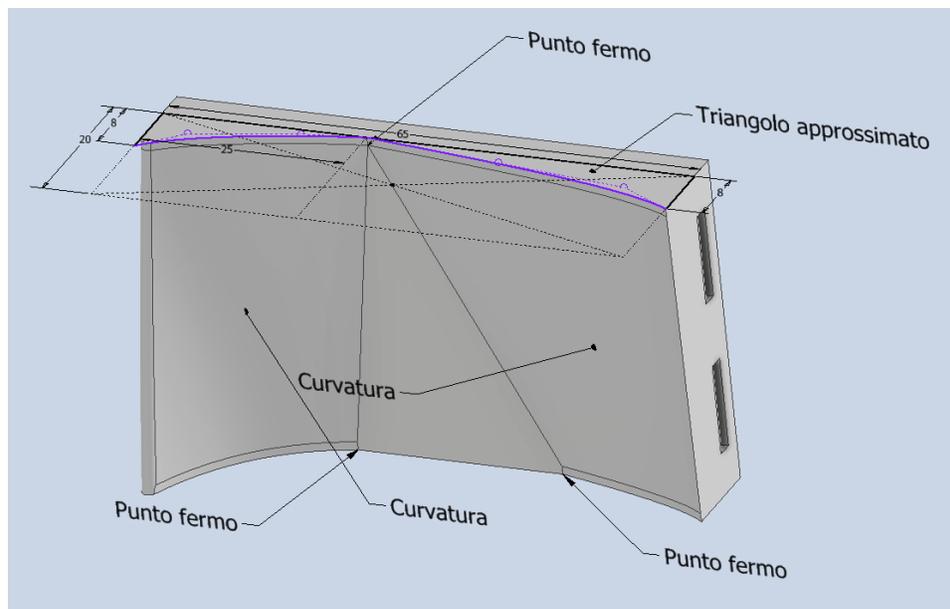
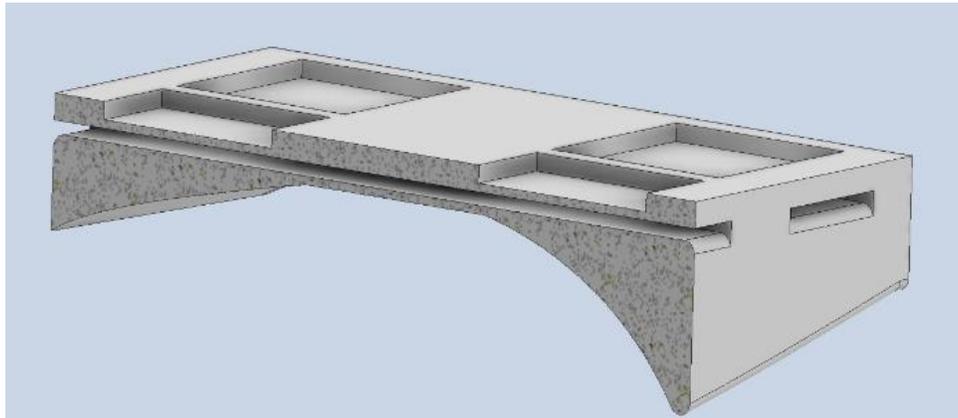


Figura 45, supporto scheda, parte 1

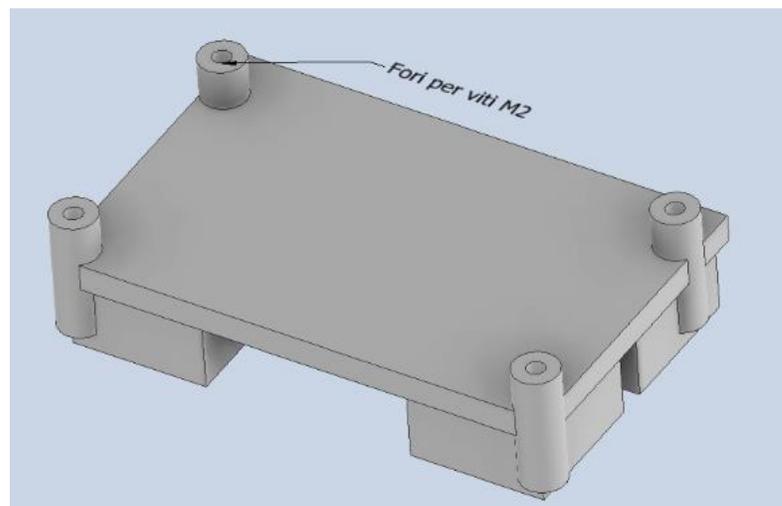
Su questa parte del supporto inoltre sono presenti due sedi per gli elastici di collegamento al guanto, tali elastici vengono fatti passare nei fori e successivamente cuciti alle estremità al guanto in modo tale da rimanere in tensione per garantire una buona aderenza del supporto al guanto senza movimenti.



*Figura 46, vista in semisezione, passaggio per gli elastici*

Per ultimi sulla superficie del supporto sono presenti 4 sedi quadrate per il posizionamento del Dual Lock che servirà per collegare la seconda parte del supporto al guanto.

- La seconda parte del supporto della scheda viene modellata in modo tale da potersi collegare alla scheda tramite viti M2, e per potersi collegare al supporto del dorso della mano tramite il Dual Lock. Inoltre in questa parte è stato creato uno spazio per l'inserimento a incastro della batteria della scheda.



*Figura 47, fori per viti M2*

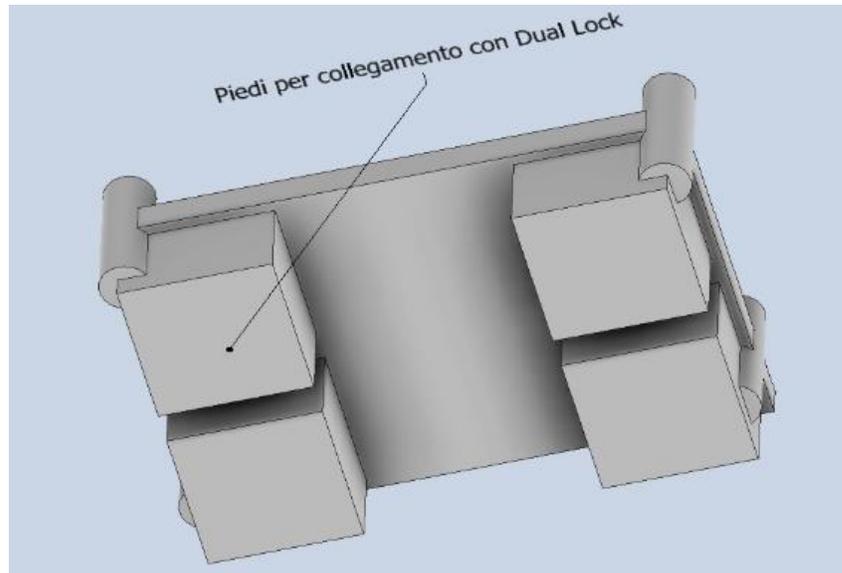


Figura 48, piedi per collegamento con Dual Lock

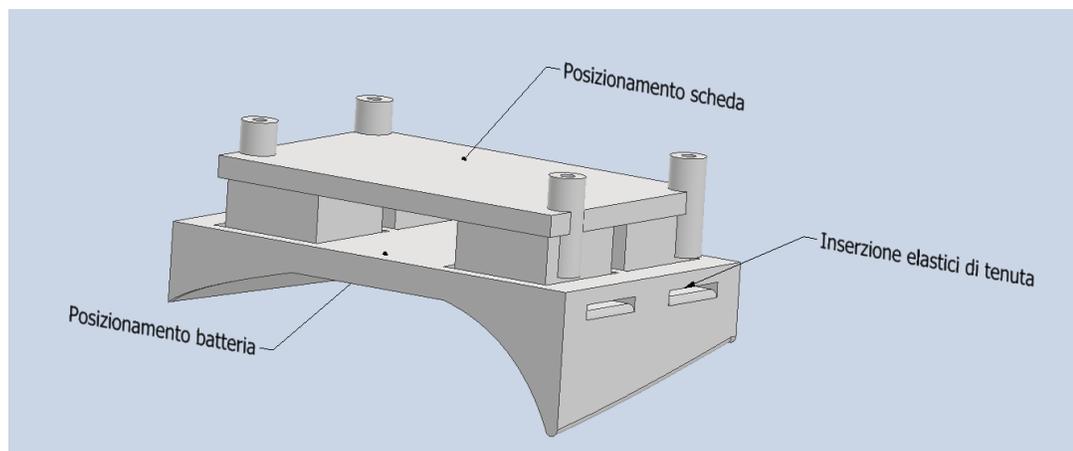
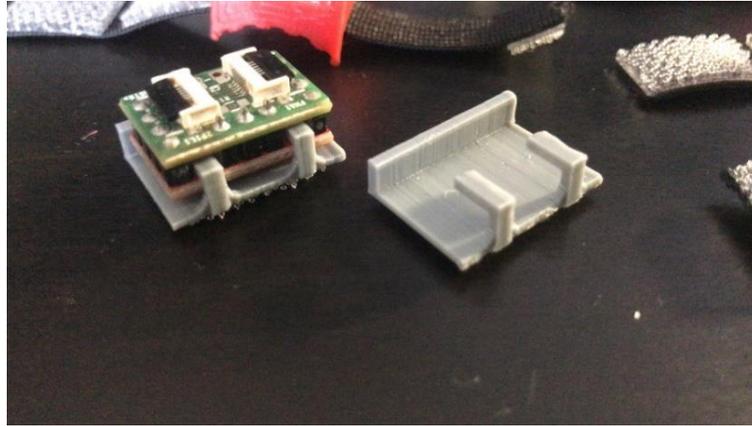


Figura 49, assemblaggio del supporto scheda

## 4.5.2 Modello finale e guanto completo

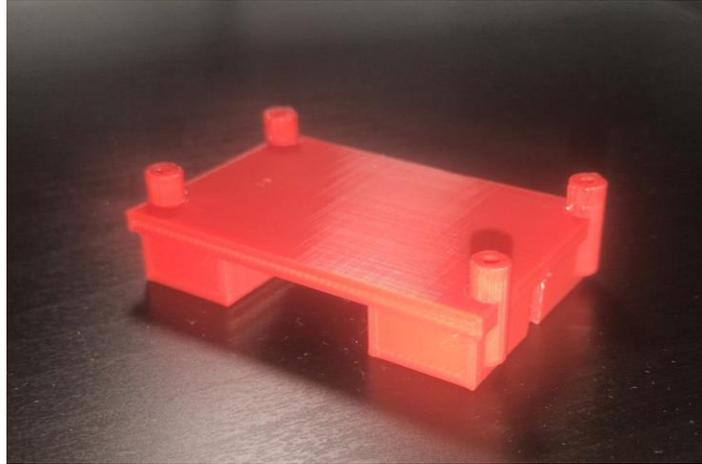
Nelle seguenti immagini viene rappresentato il modello definitivo del guanto:



*Figura 50, supporto sensore*



*Figura 51, supporto scheda parte 1*



*Figura 52, supporto scheda parte 2*



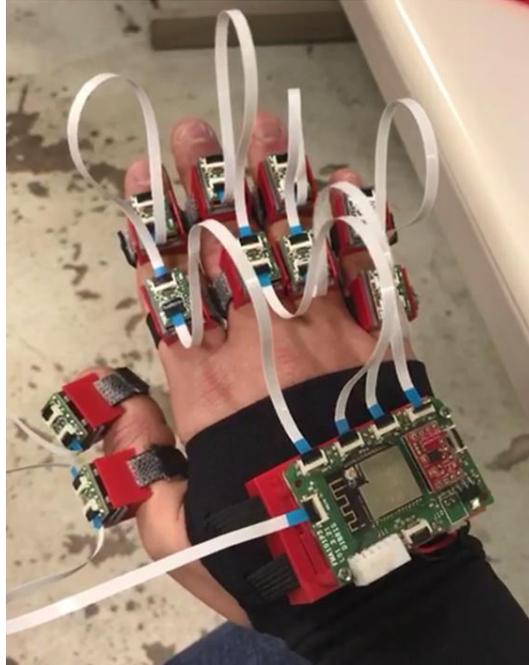
*Figura 53, tutti i componenti*



*Figura 54*



*Figura 57, Assemblaggio scheda*



*Figura 56, guanto e il sistema di sensori*

### **4.5.3 Supporti per robot e Scatola**

Seguendo le specifiche richieste doveva essere sviluppato un sistema che potesse essere uno standard e che potesse essere utilizzato sia su una mano umana sia su una mano antropomorfa. Presso il laboratorio del gruppo TER (TheEngineRoom) le sperimentazioni venivano effettuate utilizzando il sistema di sensori già descritto su una mano robotica antropomorfa montata sul Cobot Baxter in particolare la mano utilizzata è il modello AR10 Humanoid-Robotic-Hand di Active Robots.



*Figura 57, AR10 Humanoid-Robotic-Hand*

Per rendere il Sistema di sensori utilizzabile anche su AR10 è stato necessario modellare un sistema di supporti adeguato in modo tale da rendere agevole lo spostamento del sistema di sensori dal guanto (mano umana) alla mano robotica (AR10).

Mentre il guanto presenta due parti (anello e supporto sul dorso della mano), in questo caso il sistema si suddivide in tre parti:

- 1) Supporto per l'unità centrale
- 2) Supporto per la falange prossimale
- 3) Supporto per la falange intermedia

Per la realizzazione di tutte le parti si è sfruttata la geometria della mano. In particolare:

- Per la creazione del supporto sul dorso si è creata una parte che presenta dei ganci a incastro che si vanno ad attaccare alla piastra metallica che costituisce il palmo della mano, sulla superficie della parte sono presenti 4 sedi per il Dual Lock, come nel supporto per il dorso della mano umana:

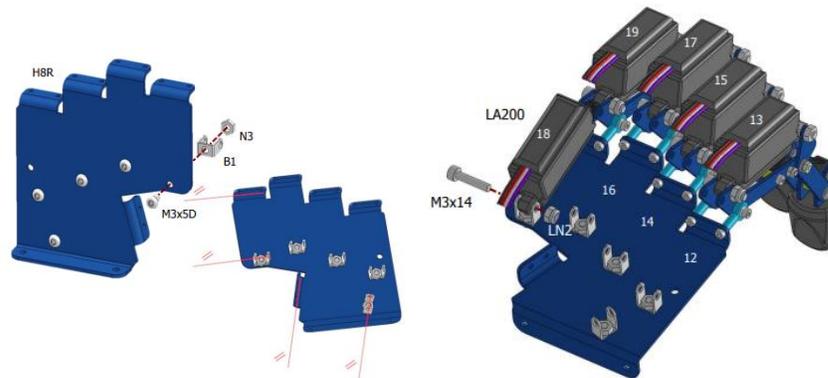


Figura 58, mano AR10, particolare di assemblaggio della piastra del palmo

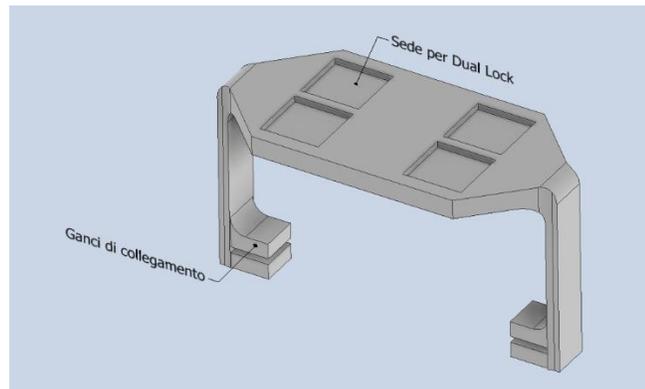


Figura 59, supporto scheda per AR10

- Sulla falange prossimale del robot sono presenti dei servo-motori che non lasciano spazio per il collegamento direttamente alla mano per cui si è creato un semplice pezzo che presenta un'apertura che va ad abbracciare il motore a incastro:

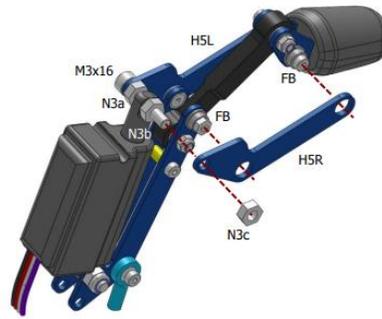


Figura 60, mano AR10, particolare di assemblaggio del dito

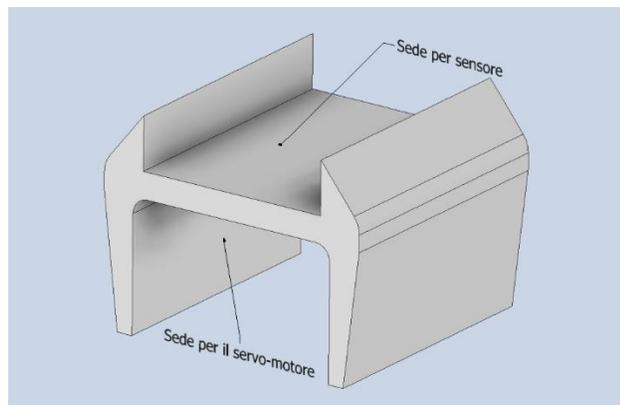


Figura 60, supporto sensore falange prossimale

- Nella modellazione del supporto per la falange intermedia si è sfruttata la struttura metallica del dito che è formato da due piastre sottili che lasciano spazio tra loro per una biella di collegamento che ha la funzione di piegare la falange distale in automatico durante il piegamento dell'intero dito. Tale biella durante il suo spostamento occupa un determinato spazio di cui è necessario tenere conto in modo tale da non intralciare il movimento della biella:

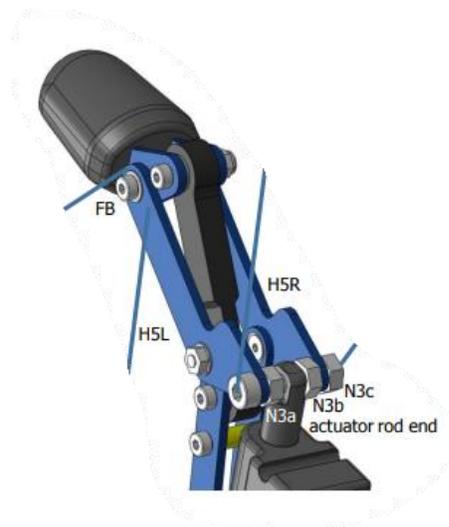


Figura 61, mano AR10, particolare di assemblaggio falange intermedia

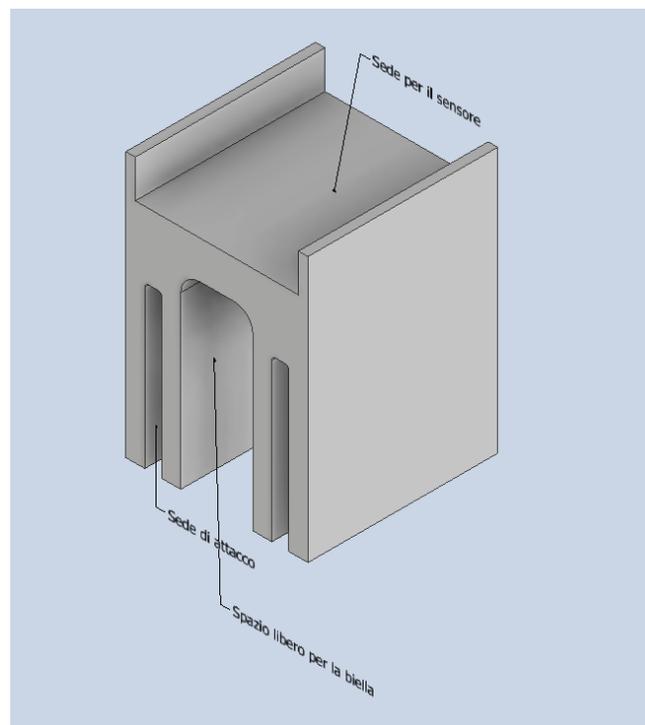
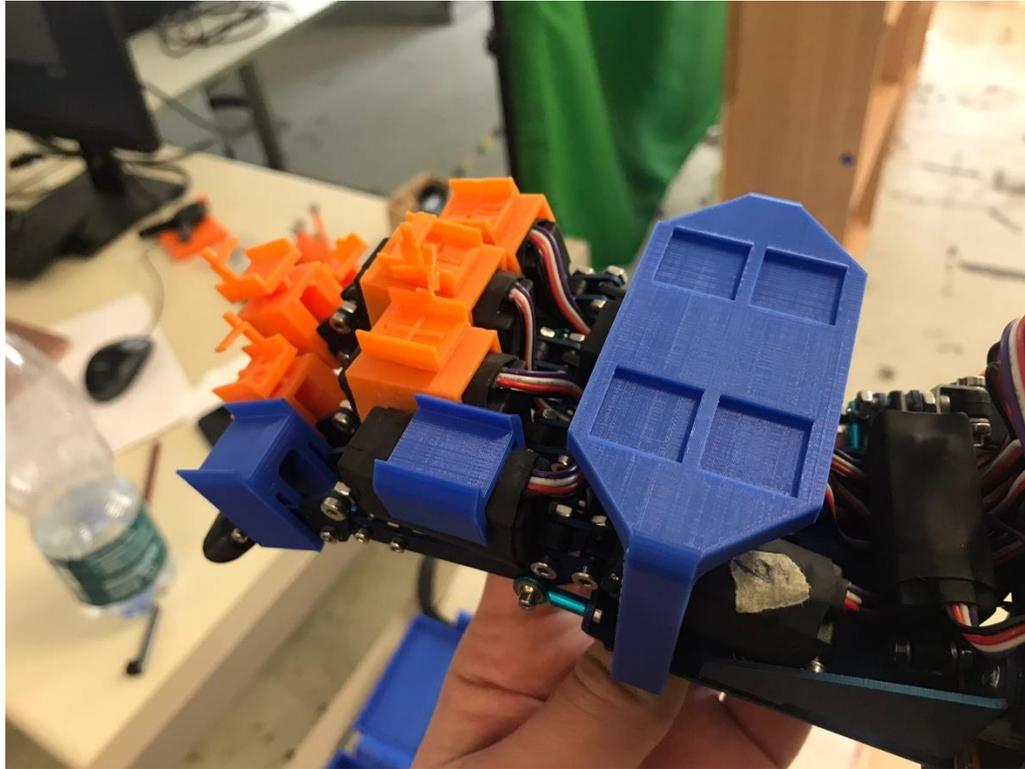


Figura 62, supporto sensore falange intermedia

Con questo si conclude lo sviluppo dei supporti per il sistema di sensori. In particolare con lo sviluppo di supporti per la mano AR10 viene soddisfatta la richiesta della modularità e flessibilità di utilizzo del sistema di sensori:



*Figura 63, supporti sulla mano AR10*

Per completare il lavoro si è voluto creare una scatola di contenimento dell'intero sistema di supporti. Per farlo si sono creati diversi modelli tutti accettabili. I primi prototipi creati sono delle semplici scatole senza alcun particolare complesso. Tuttavia si è voluto creare una scatola che avesse una struttura interna per scompartimenti e un coperchio. Per farlo la scatola è stata suddivisa idealmente in tre parti:

- Contenitore
- Coperchio
- Elemento di chiusura

Il contenitore presenta 4 scompartimenti di diverse dimensioni per contenere le diverse componenti del guanto. Il contenitore e il coperchio vengono uniti da due sistemi a cardine che ne permettono la rotazione relativa per chiusura-apertura. Il sistema di chiusura può essere realizzato in diversi modi. Per il nostro caso si è scelta una chiusura a gancio.

In particolare è stata realizzata una geometria della scatola, del coperchio e del sistema a cardine che potesse essere prodotta con stampa 3D stampando l'assieme come pezzo unico. Per fare ciò si sono sfruttate le tecniche DFMA descritte precedentemente. Il coperchio e il contenitore della scatola nel modello sono già collegati tramite il cardine, prendendo 1-2mm come distanza tra anima del cardine (coperchio) e foro (contenitore) la stampante riesce a realizzare l'intero cardine senza supporti e senza quindi bloccare la rotazione.

I ganci di chiusura invece vengono stampati separatamente poiché realizzandoli come pezzo unico con l'intera scatola la deposizione degli strati di filamento risulterebbe sfavorevole. I ganci sono l'elemento soggetto al carico di flessione per la chiusura e apertura della scatola per questo motivo è necessario che vengano posizionati sul fianco sul piatto di stampa.

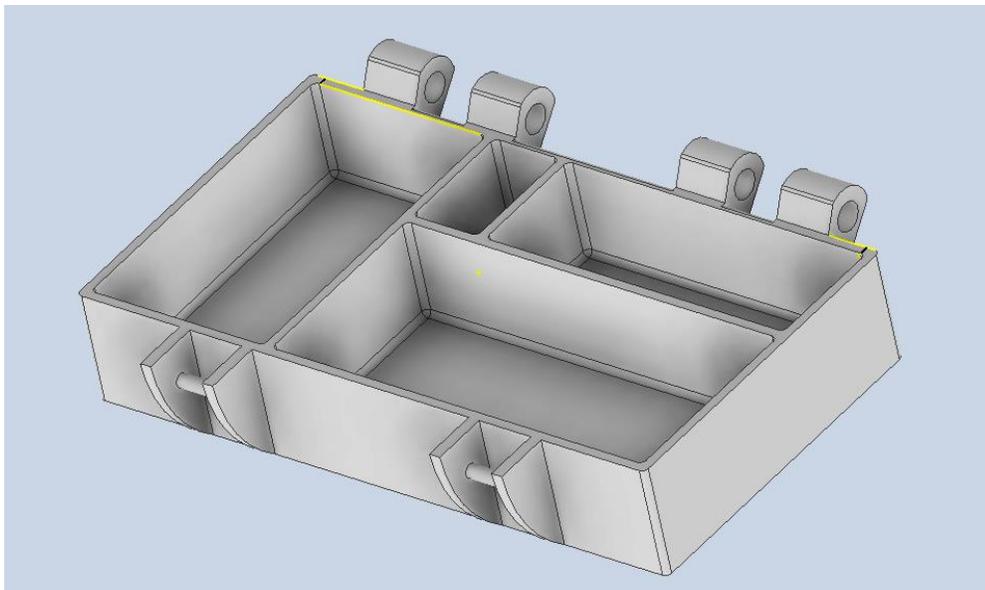


Figura 63, scatola, contenitore

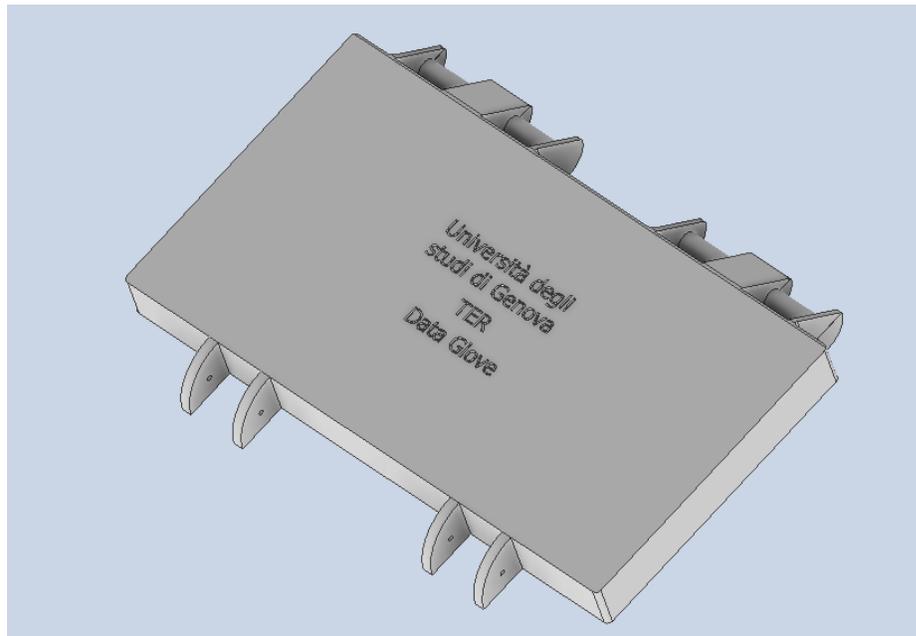


Figura 64, scatola, coperchio

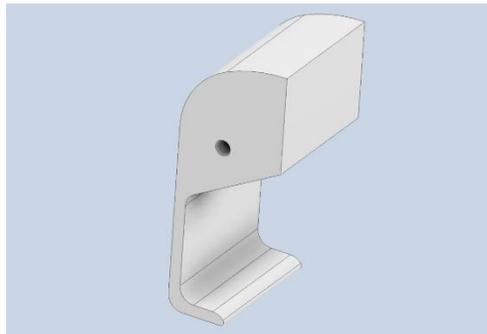
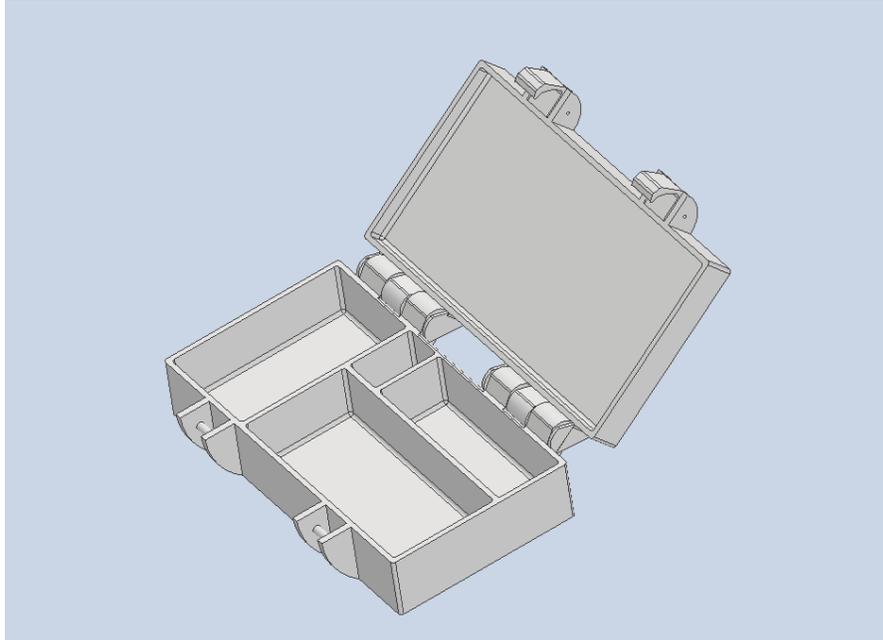
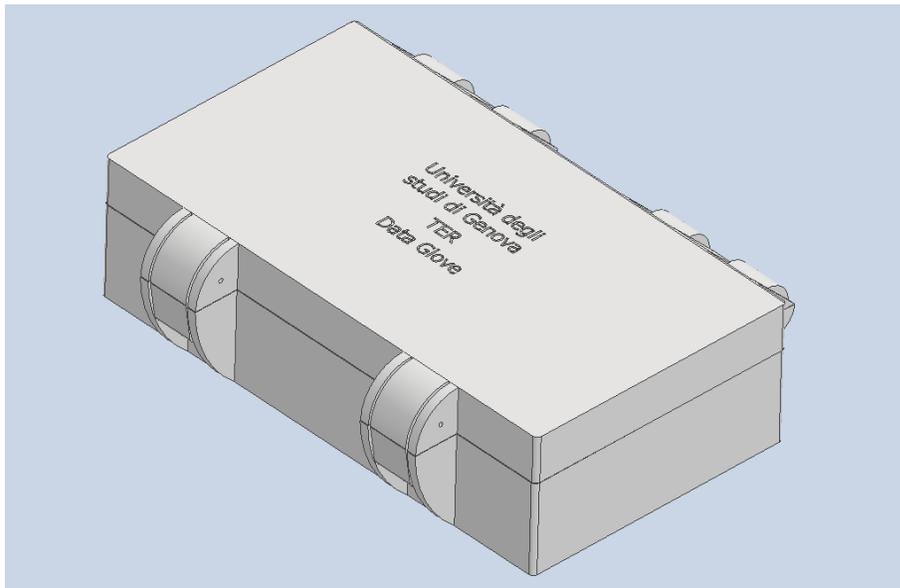


Figura 65, gancio



*Figura 66, scatola, assieme*



*Figura 67, scatola, assieme*

## 5. OpenSim IMU Inverse Kinematics

Con la conclusione della creazione del guanto è stata svolta la simulazione di utilizzo del guanto sensorizzato utilizzando la funzione IMU Inverse Kinematics del software OpenSim. OpenSim è una piattaforma per la creazione di modelli di esseri umani, animali, robot e l'ambiente e per simulare le loro interazioni e movimento. Ha un'interfaccia utente grafica (GUI) per la visualizzazione dei modelli e la generazione e l'analisi delle simulazioni.

In particolare è stata utilizzata la funzione IMU Inverse Kinematics per riprodurre il movimento della mano nell'ambiente di simulazione di OpenSim.

Per l'utilizzo di IMU Inverse Kinematics è necessario produrre innanzitutto tre diversi file da inserire in input al programma:

- *Model file (.osim)* : è il modello OpenSim. Nel nostro caso questo file corrisponde al file contenente il modello cinematico della mano, come è stato detto precedentemente per il nostro lavoro è stato utilizzato il modello cinematico della mano messo a disposizione da [11]. Tale modello richiede inoltre il posizionamento virtuale dei sensori IMU sul modello digitale della mano utilizzando la funzione IMU Placer.
- *File contenente l'orientazione dei sensori in quaternioni (.sto)* : in questo file sono raccolte le orientazioni sperimentali, sotto forma di quaternioni, ottenute attraverso delle sperimentazioni effettuate con il sistema IMU. È il file che contiene le informazioni su un determinato movimento che si vuole riprodurre.
- *File con le impostazioni (.xml)* : contiene le impostazioni necessarie per IMU Inverse Kinematics.

In questo modo in output viene generato un *file di movimento (.mot)* che contiene le traiettorie generalizzate calcolate da IMU Inverse Kinematics (angoli dei giunti e traslazioni). [29]

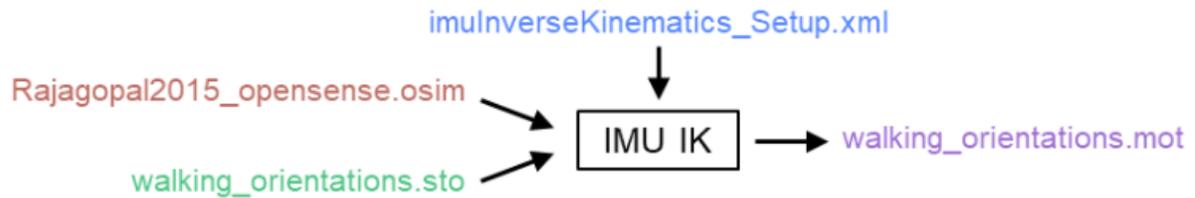


Figura 68, OpenSim IMU Inverse Kinematics [29]

Lo strumento IMU Inverse Kinematics passa attraverso ogni fase temporale (frame) del movimento e calcola i valori delle coordinate generalizzate che posizionano il modello in una posizione che "si adatta meglio" agli orientamenti IMU sperimentali.

Matematicamente, il "best match" è espresso come un problema dei minimi quadrati pesati, la cui soluzione mira a minimizzare gli errori di orientamento. [29]

La generazione dei tre file in input è stata possibile grazie al lavoro svolto da Valerio Belcamino, dottorando del gruppo TER, che ha creato tutto il codice necessario per il corretto funzionamento della simulazione.

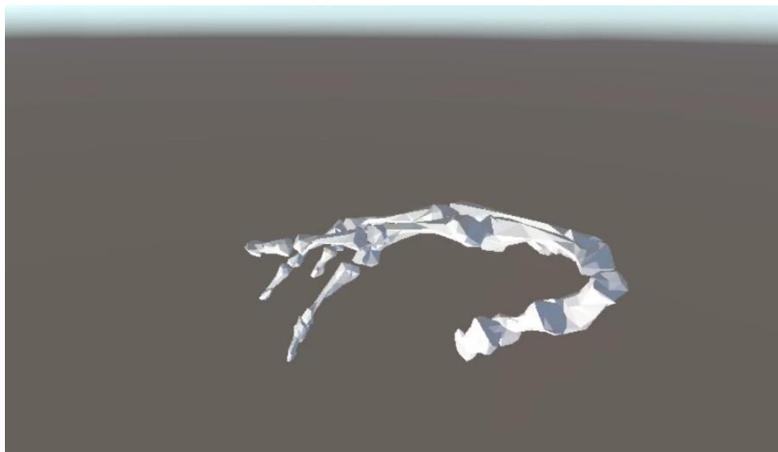


Figura 69, simulazione

## **Bibliografia e sitografia**

- [1] \*. L. C. D. L. M. V. T. S. a. T. S. Christina Salchow-Hömmen, «A Tangible Solution for Hand Motion Tracking in Clinical Applications,» 8 Gennaio 2019. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6339214/>.
- [2] P. I. S. A. S. Rudy Hartanto, «ResearchGate,» Agosto 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/270573485\\_Real\\_Time\\_Hand\\_Gesture\\_Movements\\_Tracking\\_and\\_Recognizing\\_System](https://www.researchgate.net/publication/270573485_Real_Time_Hand_Gesture_Movements_Tracking_and_Recognizing_System).
- [3] T. G. Zimmerman.U.S. Brevetto 4.542.291, 17 September 1985.
- [4] J. L. T.G. Zimmerman.U.S. Brevetto 4.988.981, 29 January 1991.

- [5] W.-Y. K. Seunghyeok Shin, «Skeleton-based Dynamic Hand Gesture Recognition Using a Part-based GRU-RNN for Gesture-based Interface,» *ResearchGate*, 2020.
- [6] J. B. Ian M. Bullock, «Assessing assumptions in kinematic hand models: A review,» Giugno 2012. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/257045252\\_Assessing\\_assumptions\\_in\\_kinematic\\_hand\\_models\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/257045252_Assessing_assumptions_in_kinematic_hand_models_A_review).
- [7] J. T. a. E. M. R. Tubiana, *Examination of the Hand and Wrist*, Taylor and Francis, 1998.
- [8] N. N. Balaji, «Dynamics and Control of Closed Kinematic Chains: A Numerical Investigation,» *ResearchGate*, 2017.
- [9] P. F. F. P. M. Callegari, *Meccanica Applicata alle Macchine*, DeAgostini Scuola, 2013.
- [1] I. G. L. M. Prof. Ing. Domenico Trattichizzo, *Lezioni di Robotica e Visione Artificiale, dispense 0] per il corso*.
- [1] A. Gustus, G. Stillfried, V. Judith, H. Jörntell e P. van der Smagt, «Human hand modelling: 1] kinematics, dynamics, applications,» Springerlink.com, 2012.
- [1] G. Stillfried, U. Hillenbrand, M. Settles e P. van der Smagt, «MRI-Based Skeletal Hand 2] Movement,» 2014.
- [1] A. Gustus, G. Stillfried, J. Visser, H. Jörntell e P. van der Smagt, «Human hand modelling: 3] kinematics, dynamics, applications,» 2012.
- [1] A. Carfí, T. Patten, Y. Kuang, A. Hammoud, M. Alameh, E. Maiettini, A. I. Weinberg, D. Faria, 4] F. Mastrogiovanni, G. Alenyá, L. Natale, V. Perdereau, M. Vineze e A. Billard, «"Hand-object interaction: From human demonstrations to human manipulation", *Frontiers in Robotics and AI*, vol 8,» 2021.

[1 [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Tessuti\\_molli](https://it.wikipedia.org/wiki/Tessuti_molli).

5]

[1 [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Apparato\\_tegumentario](https://it.wikipedia.org/wiki/Apparato_tegumentario).

6]

[1 [Online]. Available: <https://www.rokoko.com/>.

7]

[1 Formlabs, «Formlabs,» [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/design-for->

8] [manufacturing-with-3d-printing/](https://formlabs.com/blog/design-for-manufacturing-with-3d-printing/).

[1 S. N. G. P. Pshtiwan Shakor, «A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-

9] Reinforcement in 3D Printed Mortar,» *mdpi*, 2019.

[2 Protolabs, «Protolabs,» 4 Ottobre 2022. [Online]. Available:

0] <https://www.protolabs.com/resources/blog/considerations-for-3d-printed-part-orientation/>.

[2 G. Shields, «PrintPool,» 4 Novembre 2022. [Online]. Available:

1] <https://www.printpool.co.uk/articles/which-way-is-up-a-comprehensive-guide-to-build-orientation-in-3d-printing>.

[2 [Online]. Available: <https://www.restorativeneurotechnologies.com/articoli-riabilitazione->

2] [cognitiva/il-recupero-motorio-post-ictus](https://www.restorativeneurotechnologies.com/articoli-riabilitazione-cognitiva/il-recupero-motorio-post-ictus).

[2 Pitchford, «Frontiers in Psychology,» 2013.

3]

[2 B. MaterialScience, *Snap-fit joints for plastics*.

4]

[2 B. MaterialScience, *Engineering Polymers. Part and Mold design, Thermoplastics. A design*  
5] *guide..*

[2 3. Italia. [Online]. Available: [https://www.3mitalia.it/3M/it\\_IT/p/d/b40068905/](https://www.3mitalia.it/3M/it_IT/p/d/b40068905/).

6]

[2 U. Petterson, «Surfaces design for low and high friction,» Uppsala Universitet, Uppsala, 2005.

7]

[2 Wikipedia. [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Zigrinatura>.

8]

[2 Stanford, «simtk-confluence.stanford.edu,» [Online]. Available: <https://simtk->

9] [confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Getting+Started+with+IMU+Inverse+Kinematics](https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Getting+Started+with+IMU+Inverse+Kinematics).

[3 chisellabs. [Online]. Available: <https://chisellabs.com/glossary/what-is-rapid-prototyping/>.

0]