



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**PROTOTIPAZIONE RAPIDA DI UN GIUNTO SFERICO
RICONFIGURABILE PER APPLICAZIONI ROBOTICHE**

**RAPID PROTOTYPING OF A RECONFIGURABLE
UNIVERSAL JOINT FOR ROBOTIC APPLICATIONS**

Relatore:
Prof. Ing. Matteo Claudio Palpacelli

Tesi di laurea di:
Marco Popazzi

Correlatore:
Ing. Daniele Costa

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1. IL ROBOT 3-URU	2
1.1 MANIPOLATORI RICONFIGURABILI.....	2
1.2 IL ROBOT RICONFIGURABILE 3-URU	7
CAPITOLO 2. IL GIUNTO RICONFIGURABILE	11
2.1 CONCEPTUAL DESIGN DEL GIUNTO	11
2.2 DESIGN FUNZIONALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE	13
2.2.1 I principi operazionali.....	14
2.2.2 Il meccanismo di bloccaggio	16
2.3 CONCLUSIONI SUL GIUNTO RICONFIGURABILE	18
CAPITOLO 3. LA PROTOTIPAZIONE RAPIDA	19
3.1 L'ADDITIVE MANUFACTURING	19
3.1.1 Cos'è l'Additive Manufacturing.....	19
3.1.2 Principali tecnologie di Additive Manufacturing	21
3.2 LA FORM 3 DI FORMLABS	27
3.2.1 Specifiche tecniche della Form 3.....	28
CAPITOLO 4. REALIZZAZIONE DEL GIUNTO	31
4.1 IL PROCESSO DI REALIZZAZIONE	31
4.1.1 Progettazione CAD	32
4.1.2 Preparazione delle stampe	34
4.1.3 Stampa e post-processing.....	37
4.1.4 Assemblaggio.....	42

CONCLUSIONE E LIMITI	47
5.1 SVILUPPI FUTURI E PROBLEMATICHE RISCONTRATE	47
5.1.1 Sviluppi Futuri	47
5.1.2 Problematiche riscontrate	47
BIBLIOGRAFIA	49
SITOGRAFIA	53
RINGRAZIAMENTI.....	55

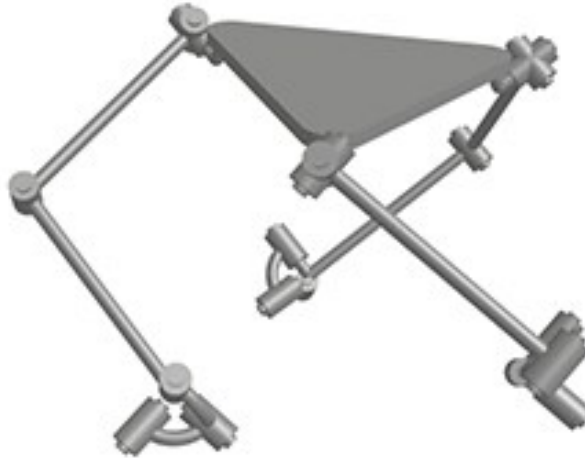
INTRODUZIONE

La prototipazione rapida, meglio conosciuta come additive manufacturing o stampa 3D, è una nuova metodologia di realizzazione di prodotti che sta trovando numerose applicazioni in svariati settori. Questa tesi nasce quindi con l'intento di descrivere come la tecnologia appena descritta è stata sfruttata per la realizzazione del prototipo di un giunto sferico riconfigurabile facente parte di un robot a cinematica parallela denominato 3-URU.

Si partirà da una descrizione generale delle problematiche che hanno spinto alla progettazione del robot per poi passare alla descrizione del design concettuale e funzionale del giunto stesso. Si illustreranno inoltre le varie tipologie di manifattura additiva e infine tutto il processo seguito, step-by-step, per giungere alla realizzazione completa del giunto.

L'obiettivo finale di questa tesi è quello di fornire una guida attendibile e ripetibile per la realizzazione di altri componenti utilizzando questa tecnologia. Inoltre, lo scopo sarà anche quello di permettere il proseguimento del lavoro al fine di realizzare interamente il robot.

CAPITOLO 1. IL ROBOT 3-URU



1.1 MANIPOLATORI RICONFIGURABILI

Un manipolatore *ricongfigurabile* (o *metamorfo*) è un robot in grado di variare la mobilità del suo end-effector grazie a un cambiamento locale della cinematica. Questa famiglia di macchine rappresenta una soluzione alla crescente richiesta di flessibilità che arriva da parte dell'odierna industria manifatturiera. I metodi che possono essere utilizzati per modificare la struttura cinematica del manipolatore sono diversi; il più utilizzato è sicuramente l'utilizzo di un giunto bloccabile, ovvero un giunto con un certo numero di gradi di libertà (*DOF, Degrees Of Freedom*), uno dei quali può essere bloccato selettivamente al fine di modificare la mobilità risultante del robot. La famiglia delle macchine a cinematica parallela (*PKMs, Parallel Kinematics Machines*) trae importanti vantaggi dallo sviluppo dei giunti riconfigurabili i quali, da una piccola modifica della cinematica delle gambe, possono portare ad un sostanziale modifica della mobilità

globale. Lo svantaggio maggiore delle PKMs è sicuramente la limitata disponibilità di uno spazio di lavoro abile, per questo la possibilità di modificare localmente (o temporaneamente) le capacità motorie di una particolare struttura cinematica può suscitare un importante interesse.

Come ben sappiamo, molte topologie di giunto ad anello chiuso, tipiche delle PKMs, possono presentare diversi assemblaggi o “modi” di lavoro, caratterizzati da differenti capacità di movimento, le quali corrispondono a differenti soluzioni cinematiche del robot^{1,2,3}. Il risultato dello sfruttamento di due, tre, o più modi di assemblaggio della macchina possono aumentare l’usabilità della stessa nelle applicazioni industriali. Alcuni studi si sono anche focalizzati sulla possibilità di modificare la mobilità del robot cambiando la modalità di assemblaggio ma evitando lo smontaggio del manipolatore^{4,5,6,7,8}. Ulteriore attenzione è stata riservata alla modifica temporale della struttura cinematica: in questi casi un giunto bloccabile propriamente azionato durante il movimento può migliorare la capacità di eseguire operazioni di

¹ Chablat, D.; Wenger, P. Working modes and aspects in fully parallel manipulators. In Proceedings of the IEEE 1998 International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 20–20 May 1998; Vol. 3, pp. 1964–1969

² Chablat, D.; Kong, X.; Zhang, C. Kinematics, workspace and singularity analysis of a multi-mode parallel robot. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August 2017; Vol. 5A.

³ Au, W.; Chung, H.; Chen, C. Path planning and assembly mode-changes of 6-DOF Stewart-Gough-type parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory* **2016**, 106, 30–49.

⁴ Tian, C.; Fang, Y.; Guo, S.; Qu, H. A class of reconfigurable parallel mechanisms with five-bar metamorphic linkage. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C* **2017**, 231, 2089–2099.

⁵ Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. Reconfigurability and unified kinematics modeling of a 3rTPS metamorphic parallel mechanism with perpendicular constraint screws. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2013**, 29, 121–128.

⁶ Khalid, A.; Mekid, S. Design synthesis of a three legged SPS parallel manipulator. In Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, Manchester, UK, 14–16 July 2010; pp. 169–173.

⁷ Ye, W.; Fang, Y.; Guo, S. Structural synthesis of a class of metamorphic parallel mechanisms with variable mobility. In *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*; Springer: London, UK, 2012; pp. 119–126.

⁸ Finistauri, A.; Xi, F. Reconfiguration analysis of a fully reconfigurable parallel robot. *J. Mech. Robot.* **2013**, 5, 041002.

posizionamento^{9,10,11}. Inoltre, la modularità tipica dei robot può essere ricercata anche nelle PKMs riconfigurabili^{12,13}, dove una combinazione di bracci elementari, a volte previsti di giunti bloccabili, possono essere sfruttati per assemblare manipolatori caratterizzati da capacità di movimento differenti. Inoltre, un robot parallelo con piena mobilità a 6-DOF con sei motori può anche trarre vantaggi dal giunto bloccabile per comportarsi come un manipolatore con le gambe¹⁴, il quale può eseguire operazioni di macchine a sei assi ma anche raggiungere le altre stazioni di lavoro. Nella letteratura scientifica possiamo trovare alcuni esempi di giunti bloccabili^{15,16,17,18,19}; in particolare, coppie cinematiche multi-DOF sono ottenute tramite la composizione di coppie cinematiche elementari le quali vengono poi bloccate alternativamente; tuttavia, il cambiamento di configurazione del giunto viene spesso gestito manualmente, senza

⁹ Grosch, P.; Di Gregorio, R.; López, J.; Thomas, F. Motion planning for a novel reconfigurable parallel manipulator with lockable revolute joints. In Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, AK, USA, 3–7 May 2010; pp. 4697–4702.

¹⁰ Taherifar, A.; Alasty, A.; Salarieh, H.; Boroushaki, M. Path planning for a hyper-redundant manipulator with lockable joints using PSO. In Proceedings of the First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, Iran, 13–15 February 2013; pp. 224–229.

¹¹ Aukes, D.; Heyneman, B.; Ulmen, J.; Stuart, H.; Cutkosky, M.; Kim, S.; Garcia, P.; Edsinger, A. Design and testing of a selectively compliant underactuated hand. *Int. J. Robot. Res.* **2014**, *33*, 721–735.

¹² Xi, F.; Li, Y.; Wang, H. A module-based method for design and analysis of reconfigurable parallel robots. In Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Xi'an, China, 4–7 August 2010; pp. 627–632.

¹³ Zhang, T.; Zhang, W.; Gupta, M. An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution. *Mech. Mach. Theory* **2018**, *124*, 248–258.

¹⁴ Yang, H.; Baradat, C.; Krut, S.; Pierrot, F. An agile manufacturing system for large workspace applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2016**, *85*, 25–35.

¹⁵ Zhang, W.J. A new class of linkage with synthesis method for exact dwell motion at 1 and/or 2 limit positions of output link. In Proceedings of the 24th ASME Mechanisms Conference, Irvine, CA, USA, 18–22 August 1996; pp. 1–5.

¹⁶ Chen, W.; Zhang, J.; Quan, J.; Lv, T. A novel spherical joint designed for metamorphic mechanism. In Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Chengdu, China, 21–24 September 2008; pp. 976–981.

¹⁷ Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. Reconfiguration and static joint force variation of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with 3R and 1T2R motion. *Mech. Mach. Sci.* **2016**, *36*, 213–222.

¹⁸ Zhang, T.; Zhang, W.J.; Gupta, M.M. A Novel Docking System for Modular Self-Reconfigurable Robots. *Robotics* **2017**, *6*, 25.

¹⁹ Yuan, C.W.; Yin, R.X.; Zhang W.J.; Chen, G. A new under-actuated resilient robot. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff, AB, Canada, 5–8 October 2017; pp. 1202–1207.

prendersi cura del comportamento del manipolatore durante la transizione. Infatti, può accadere che il robot passi attraverso una configurazione sotto-vincolata, guadagnando temporaneamente gradi di libertà: in questo caso, solo un supporto esterno manuale permette di bloccare il robot nella sua posizione.

I ricercatori del Laboratorio di Robotica dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona negli ultimi anni hanno sviluppato diversi studi sui robot riconfigurabili sfruttando il concetto di giunto bloccabile. Per prima cosa, si sono focalizzati sull'architettura a tre gambe Cilindrica-Prismatica-Universale (3-CPU): questa consente la progettazione di un treppiede riconfigurabile in grado di eseguire movimenti di pura traslazione o pura rotazione, in base all'orientazione degli assi dei giunti riconfigurabili^{20,21}. Il passaggio tra le due mobilità per mezzo di un giunto bloccabile è stato poi affrontato in [22]²². Nonostante le funzionalità descritte, l'architettura a 3-CPU possiede alcuni svantaggi intrinseci. In particolare, la maggiore problematica che affligge questa architettura è la necessità di riconfigurare i giunti passivi che connettono l'end-effector alla struttura: ciò implica che il meccanismo bloccabile deve far parte della struttura delle gambe, rendendo più complessa la progettazione meccanica (per le limitazioni in peso e grandezza del dispositivo) e portando ad una riduzione del carico utile.

²⁰ Carbonari, L.; Callegari, M. The kinematotropic 3-CPU parallel robot: Analysis of mobility and reconfigurability aspects. In *Latest Advances in Robot Kinematics*; Springer: Berlin, Germany, 2012; pp. 373–380.

²¹ Carbonari, L.; Callegari, M.; Palmieri, G.; Palpacelli, M.C. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines. *Mech. Mach. Theory* **2014**, *79*, 173–183.

²² Palpacelli, M.C.; Carbonari, L.; Palmieri, G. Details on the design of a lockable spherical joint for robotic applications. *J. Intell. Robot. Syst.* **2016**, *81*, 169–179.

Di conseguenza, sono state studiate differenti topologie, che avevano in comune con il manipolatore 3-CPU le stesse tipologie di mobilità²³: tra queste è stata selezionata l'architettura 3-URU (Universale-Rotoidale-Universale) per progettare un nuovo manipolatore riconfigurabile^{24,25}. Il manipolatore 3-URU deriva dalla topologia 3-SRU (Sferica-Rotoidale-Universale): il giunto sferico che connette la gamba alla piattaforma fissa può essere pensato come la composizione di tre giunti rotoidali con assi concorrenti; bloccando uno di questi, il giunto diventa un giunto universale con differenti sequenze di rotazione. Due delle possibili rotazioni, come descritto nella prossima sezione, offrono una piattaforma mobile con la capacità di muoversi rispettivamente di pura rotazione e di pura traslazione.

²³ Palpacelli, M.; Carbonari, L.; Palmieri, G.; Callegari, M. Mobility analysis of non-overconstrained reconfigurable parallel manipulators with 3-CPU/3-CRU kinematics. In *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*; Springer: Berlin, Germany, 2016; pp. 189–200.

²⁴ Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.C.; Palmieri, G.; Callegari, M. Functional Design and Optimization of a Novel 3-URU Multimodal Reconfigurable Robot. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August 2017; p. V009T07A050.

²⁵ Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.; Palmieri, G.; Callegari, M. A novel reconfigurable 3-URU parallel platform. In Proceedings of the International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, Torino, Italy, 21–23 June 2017; pp. 63–73.

1.2 IL ROBOT RICONFIGURABILE 3-URU

Viene allora introdotto un nuovo giunto sferico bloccabile, progettato per gestire le capacità di riconfigurazione di una macchina a cinematica parallela di tipo 3-SRU. Questo giunto è stato realizzato tramite una combinazione di coppie rotoidali (Figura 1); un sistema di bloccaggio consente di serrare uno dei primi due giunti rotoidali, dando alla macchina diverse configurazioni cinematiche del tipo 3-URU che corrispondono a differenti tipi di mobilità. Studiamo ora più approfonditamente come il giunto può influenzare la mobilità del robot.

L'architettura cinematica di ogni gamba è composta da una catena di giunti Sferico-Rotoidale-Universale (SRU). La coppia sferica, la quale deve essere ridotta a un giunto sferico per garantire il funzionamento della macchina, connette il primo corpo di ogni gamba al telaio. Il secondo corpo è collegato al primo tramite un giunto rotoidale. Infine, un giunto universale connette le gambe all'end-effector. La posizione reciproca dei giunti viene mostrata nella Figura 1. Come è ben visibile, le tre coppie sferiche sono posizionate in modo che il loro centro rimanga sull'asse del sistema di riferimento fisso $\{0\}$ alla stessa distanza, chiamata a , dall'origine. Le tre rotazioni che caratterizzano ogni coppia sono realizzate tramite tre giunti rotoidali perpendicolari, i cui assi sono concorrenti in un punto (nominato il centro della coppia sferica). A questo punto, i tre sistemi di riferimento hanno un'origine comune: chiamiamo $\{l_{1,i}\}$, $\{l_{2,i}\}$, $\{l_{3,i}\}$ questi sistemi relativi alla gamba i -esima. Nella configurazione di base, Figura 1, in cui il sistema della piattaforma mobile $\{1\}$ coincide con il sistema fisso, abbiamo che $\{l_{1,i}\}$, $\{l_{2,i}\}$ e $\{l_{3,i}\}$ coincidono. Descritti i sistemi locali, possiamo definire la disposizione dei tre assi che compongono il giunto sferico come segue:

- la prima rotazione è coassiale con il rispettivo asse del sistema di riferimento $\{0\}$. Nel sistema locale della gamba i -esima $\{l_{1,i}\}$, il vettore unitario che descrive questo asse è ${}^{l_{1,i}}\mathbf{r}_{1,i} = [1\ 0\ 0]^T$;
- la seconda rotazione è perpendicolare al primo ed è diretta lungo la gamba nella configurazione di base. Nel sistema $\{l_{2,i}\}$, avremo ${}^{l_{2,i}}\mathbf{r}_{2,i} = [0\ 0\ 1]^T$;
- l'asse della terza e ultima rotazione è perpendicolare ad entrambe gli assi della prima e della seconda rotazione nella configurazione di base. Rispettivamente nel sistema $\{l_{3,i}\}$, avremo ${}^{l_{3,i}}\mathbf{r}_{3,i} = [0\ 1\ 0]^T$;

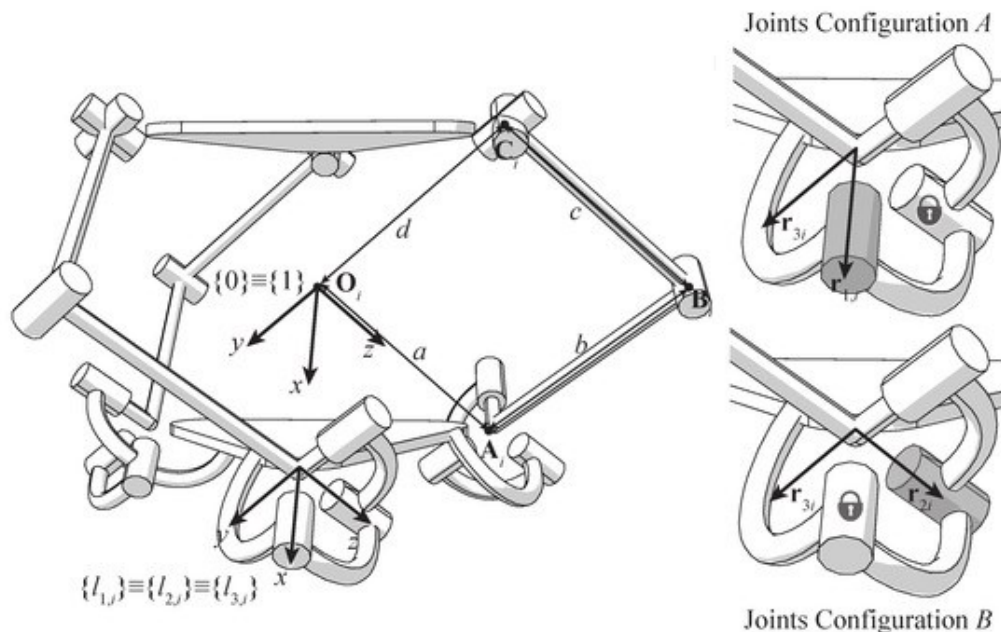


Figura 1. *Settaggio degli assi dei giunti dell'architettura cinematica riconfigurabile 3-URU*

Il meccanismo di bloccaggio viene usato in questo caso per produrre due diverse configurazioni, qui chiamate “*Configurazione Giunti A*” e “*Configurazione Giunti B*” (Figura 1). Nella configurazione *A*, la prima rotazione della coppia sferica è consentita e, in particolare, rappresenta il grado di libertà attuato della gamba i -esima. La seconda rotazione è bloccata, mentre la terza è libera. Nella configurazione *B*, la prima rotazione è bloccata, la seconda è attuata e la terza è libera. Come dimostrato in [24,25], questo

settaggio dei giunti permette la generazione di un movimento dell'end-effector di pura rotazione con la “Configurazione Giunti A” e di un movimento di pura traslazione con la “Configurazione Giunti B” senza ulteriori modifiche alla disposizione dei giunti passivi (come accadeva nel caso del 3-CRU).

Il resto della catena cinematica di ogni gamba è composto da un giunto rotoidale, parallelo all'ultima coppia rotoidale del giunto sferico riconfigurabile ad una distanza b , e da un giunto universale che connette la seconda gamba all'end-effector. Come dimostrato da Palpacelli et al. in [23], la disposizione dell'ultimo giunto della catena è anch'essa fondamentale per la mobilità dell'end-effector. In particolare, per il robot parallelo riconfigurabile 3-URU, l'ultimo giunto universale è posizionato in modo che la prima rotazione sia parallela al giunto rotoidale precedente a una distanza c , così che è perpendicolare al piano π_i (identificato dai punti \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i e \mathbf{C}_i). La seconda rotazione giace su π_i ed è perpendicolare alla precedente; sull'end-effector, questi assi sono mutuamente perpendicolari e concorrenti nell'origine del sistema mobile $\{1\}$. Inoltre, questi assi coincidono con gli assi di $\{1\}$. Rispettivamente a tale sistema di riferimento, i tre punti di attacco alla piattaforma mobile \mathbf{C}_i sono identificati dai vettori ${}^{\{1\}}\mathbf{C}_1 = [0 \ 0 \ -d]^T$, ${}^{\{1\}}\mathbf{C}_2 = [-d \ 0 \ 0]^T$, ${}^{\{1\}}\mathbf{C}_3 = [0 \ -d \ 0]^T$.

Il meccanismo bloccabile è progettato al fine di consentire alternativamente il movimento del primo e del secondo giunto rotoidale. Una soluzione simile è stata già proposta in [25] per il robot riconfigurabile 3-CRU. Ciò nonostante, la soluzione meccanica proposta ora è significativamente differente dal design precedentemente usato per modificare la mobilità di un giunto universale passivo. In questo caso, invece, la riconfigurazione implica che i giunti attuati del robot devono essere cambiati. Il progetto

meccanico del giunto riconfigurabile è ovviamente affetto da questo. Da una parte, la necessità di connettere un attuatore a giunti differenti complica relativamente il problema. Dall'altra parte, il fatto che il dispositivo bloccabile è attaccato al telaio di terra e questo non si muove insieme all'end-effector, "rilassa" i parametri di progetto in termini di peso e dimensioni, e di conseguenza in termini di costo.

CAPITOLO 2. IL GIUNTO RICONFIGURABILE

2.1 CONCEPTUAL DESIGN DEL GIUNTO

Il design concettuale si basa su un accoppiamento di ingranaggi conici, come mostrato in Figura 2. Questa soluzione è simile a quella proposta dagli autori in [23]. Tuttavia, il presente meccanismo bloccabile è stato ri-concepito al fine di consentire l'attuazione della *ruota conica D*, la quale deve essere connessa al motore. Il movimento del *corsore scorrevole C* riconfigura il giunto sferico bloccando alternativamente una delle rotazioni come descritto nel prossimo paragrafo.

Il cursore C è guidato da un attuatore in due diverse posizioni, che portano al giunto lo stesso numero di diversi modi di lavoro. Il cursore ha una forma cilindrica con un albero scanalato esterno ed un mozzo scanalato interno nella parte superiore. Nella *Configurazione A* (Figura 2.a), il cursore C ingrana il mozzo scanalato della *forcella B*. In questo caso B, C e D si comportano globalmente come un corpo rigido. A causa di ciò, la seconda *forcella E* non ruota rispetto a B. Il *corpo F* rimane libero di ruotare dato che non è vincolato in nessun modo. Questa configurazione cambia per permettere la rotazione dell'*asse x* e *y* come richiesto dal 3-URU per la rotazione pura.

Se il cursore viene spostato verso il basso nella *Configurazione B* (Figura 2.b), l'albero scanalato ingrana sia con il corpo A che con il B. Come conseguenza abbiamo che la rotazione di B rimane bloccata. La rotazione della ruota conica attuata viene invece trasmessa alla seconda forcella E, la quale rappresenta ora il grado di libertà attuato della gamba. Quindi, la configurazione B consente una rotazione attuata dell'*asse z* e una

rotazione libera attorno a y , esattamente come richiesto per la configurazione di traslazione pura.

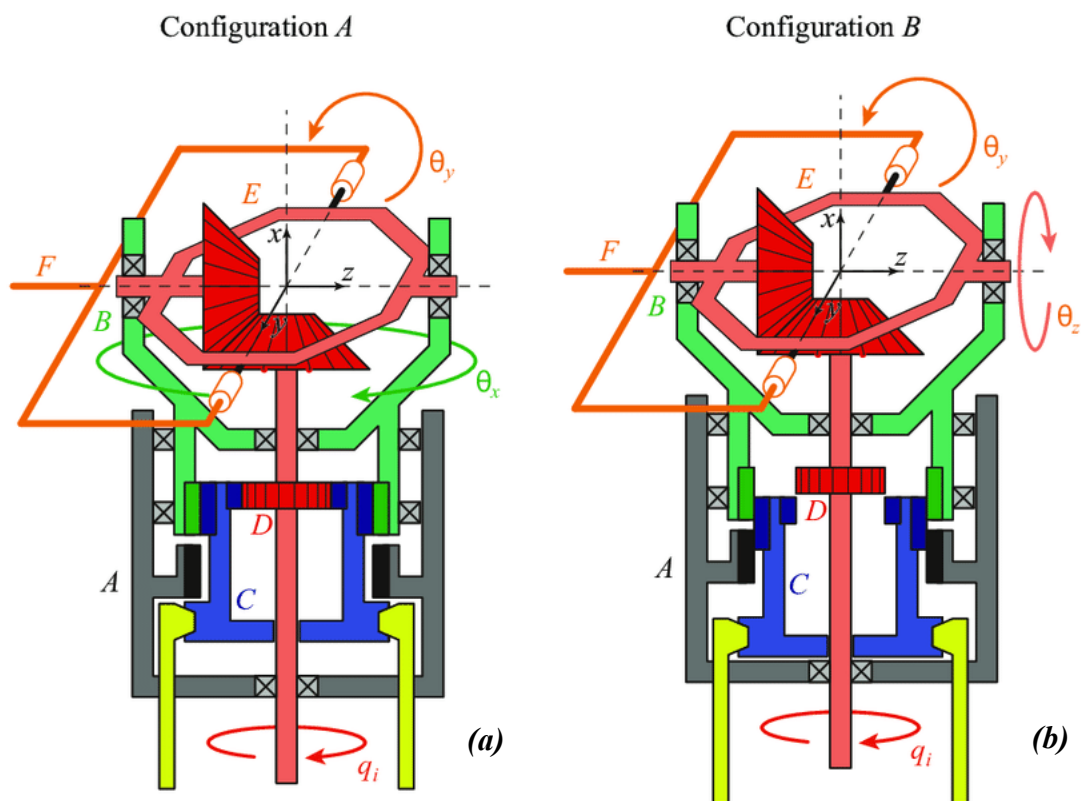


Figura 2. Schema funzionale del giunto riconfigurabile per movimenti della piattaforma mobile di rotazione pura (a) e traslazione pura (b)

2.2 DESIGN FUNZIONALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE

Partendo dal concept descritto nella sezione precedente, proponiamo e descriviamo ora un design meccanico funzionale. L'aspetto esteriore del giunto è illustrato nella Figura 3. Sia l'attuatore della gamba che l'attuatore del cursore sono posizionati esternamente e fissati a terra. Questo rappresenta un aspetto cruciale di questa versione del giunto riconfigurabile, che lo rende una versione migliorata del dispositivo riconfigurabile 3-URU: in [22], l'attuatore era dedicato alla riconfigurazione del giunto passivo dentro la catena cinematica, con una serie di conseguenti problematiche non trascurabili. Innanzitutto, l'attuatore era mosso attorno allo spazio di lavoro del robot, solidale con l'ultimo giunto della gamba (quindi solidamente con l'end-effector). D'altra parte, nel caso studio del 3-URU, non c'era la necessità di attuare il grado di libertà riconfigurante.

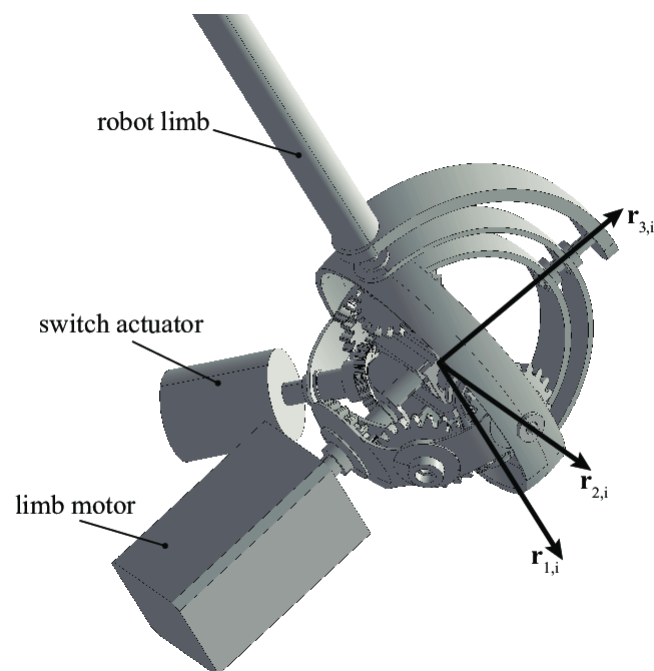


Figura 3. Design del giunto riconfigurabile

Queste considerazioni portano ad un differente design del giunto sferico, basato su una serie di collegamenti sferici connessi tramite un sistema di ingranaggi, come descritto in questa sezione. Globalmente, la mobilità è caratterizzata da una rotazione ramo attorno a $r_{3,i}$ che è sempre libera; questa rotazione è preceduta da una prima rotazione, il cui asse può essere selezionato tra $r_{1,i}$ o $r_{2,i}$ agendo sullo switch.

2.2.1 I principi operazionali

Il giunto sfrutta degli accoppiamenti di ingranaggi conici, come in un concept precedente; tuttavia, l'avvento delle nuove tecnologie di *additive manufacturing* per la prototipazione rapida di piccole parti *custom-made* ha spinto all'adozione di forme diverse per il design di questi ingranaggi. In particolare, le classiche ruote dentate coniche adottate precedentemente erano estremamente limitate in termini di dimensioni e assemblaggio. Perciò, una differente soluzione è stata adottata con ruote dentate ottenute da un guscio sferico al fine di massimizzare lo spazio disponibile tra gli accoppiamenti di ingranaggi, che può essere utilizzato per alloggiare il cursore. I componenti del giunto sono assemblati su diversi strati, come mostrato in Figura 4.

I seguenti punti, facendo riferimento alla Figura 4, spiegano come funziona il giunto riconfigurabile:

- *Configurazione Giunti A*, Figura 4.a: l'attuatore del ramo è fissato al corpo di base 0 (grigio scuro in figura) ed è connesso con la ruota conica 1 la quale muove la ruota 2 e 3. In questa configurazione, il meccanismo di bloccaggio, descritto successivamente, connette solidamente la ruota 3 con il corpo 4 (colorato in rosso in Figura 4.a). Quindi, la rotazione della ruota dentata 3 muove l'arto del robot

attorno all'asse $r_{1,i}$, come richiesto dalla Configurazione Giunti A. La ruota 5, che ruota solidamente con la 3, non influenza la mobilità fintantoché essa non è connessa con il corpo 4, così come per le ruote 6, 7, 8 e 9. La rotazione attorno all'asse $r_{2,i}$ è ristretta dal fatto che le ruote 7 e 9 sono sempre solidali alla forcella 10. Queste ruote ruotano attorno a $r_{1,i}$ per mezzo del movimento del corpo 4, evitando loro di ruotare attorno ai propri assi. La rotazione relativa a $r_{3,i}$ non è in nessun modo controllata, come richiesto dalla cinematica del robot.

- *Configurazione Giunti B*, Figura 4.b: in questa configurazione, il meccanismo di bloccaggio connette il corpo 4 con la base 0, evitando la rotazione attorno a $r_{1,i}$. L'attuazione inizia sempre dalla ruota 1 ed è trasmessa a 2, 3 e successivamente a 8 e 9. In questo caso, la rotazione della ruota dentata 9 mette in rotazione la forcella 10 attorno a $r_{2,i}$, come prescritto della cinematica richiesta dalla Configurazione Giunti B. Le ruote 5, 6 e 7 lavorano esattamente allo stesso modo realizzando un'attuazione simmetrica sulla forcella 10. Di nuovo la rotazione attorno a $r_{3,i}$ non è in nessun modo controllata.

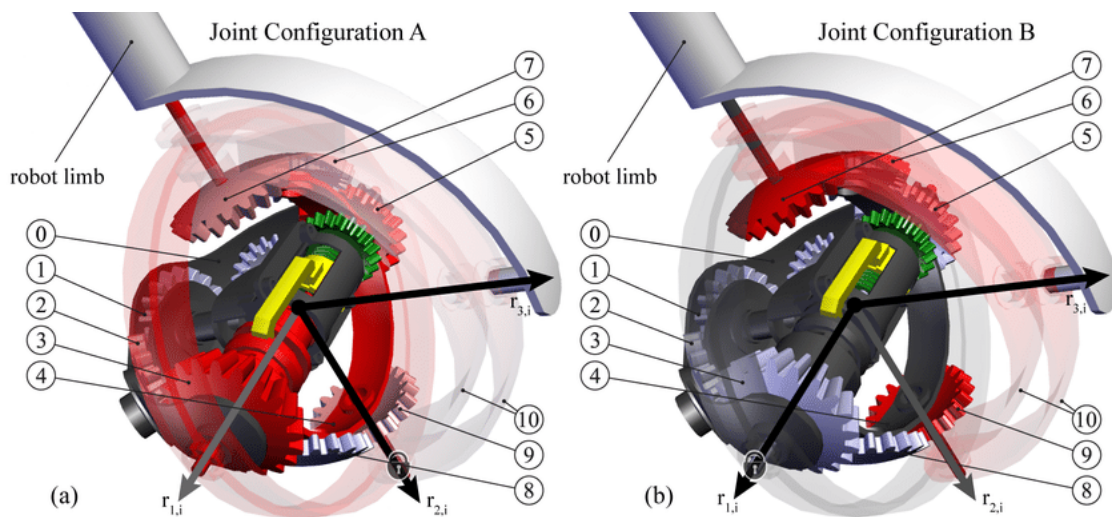


Figura 4. Dettagli del giunto riconfigurabile predisposto per la Configurazione Giunti A (a) e per la Configurazione Giunti B (b)

2.2.2 Il meccanismo di bloccaggio

L'intera funzionalità del giunto riconfigurabile è basata su un meccanismo di bloccaggio il quale è in grado di bloccare alternativamente il corpo 4 con la ruota dentata conica 3 (Configurazione Giunti A) o con la base 0 (Configurazione Giunti B). Questo meccanismo, che viene mostrato in Figura 5 per entrambe le configurazioni A e B, opera come segue:

- Configurazione Giunti A, Figura 5.a: l'attuazione del meccanismo di bloccaggio avviene attraverso la ruota conica *a*, che muove la ruota *b*, solidale a una vite. Questa vite mette in traslazione un dado connesso con la forcella *c* che spinge il cursore *d*. Il compito di questo corpo è quello di ingranare l'albero scanalato *e* con la ruota dentata conica *f*, la cui funzione è stata precedentemente spiegata (guarda ruota 3 in Figura 4.a). Va notato che l'albero scanalato *e* è parte del corpo indicato con il numero 4 in Figura 4.a.
- Configurazione Giunti B, Figura 5.b: in questo caso, il cursore ingrana l'albero *e* con l'elemento *g* che è solidale alla base. In questo modo, il corpo 4 della Figura 5.b è connesso con la base, come richiesto dalla cinematica del robot.

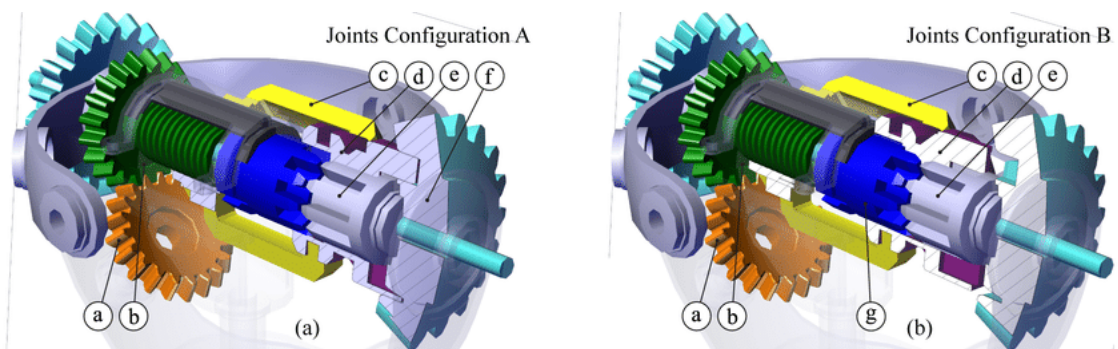


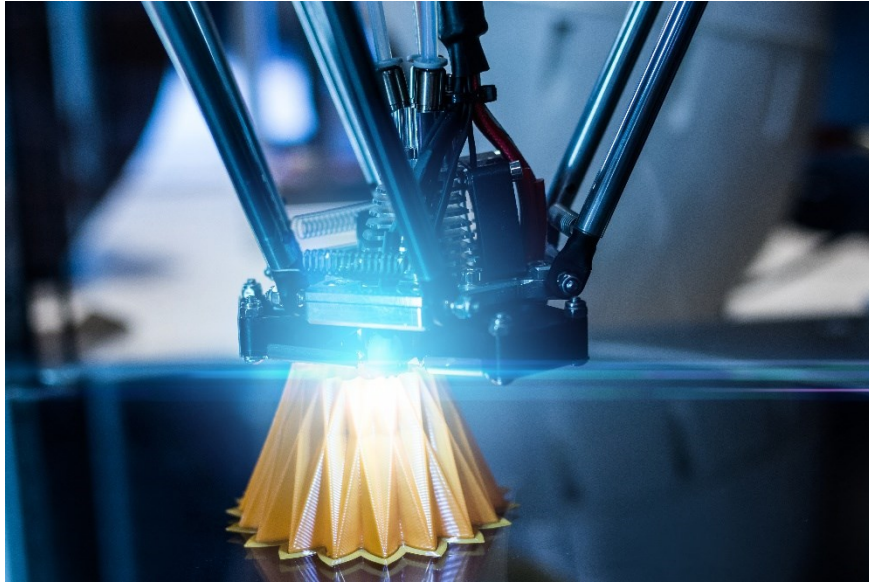
Figura 5. Accoppiamento dado-vite del meccanismo di switch disposto nella Configurazione Giunti A (a) e nella Configurazione Giunti B (b)

È importante dire che il meccanismo di bloccaggio si muoverà tramite un attuatore dedicato che deve essere il più semplice possibile. Il particolare compito che esso dovrà eseguire, di fatto, è solo quello di ruotare la ruota a attraverso due posizioni date, non è necessario che assuma posizioni intermedie. Quindi, un semplice attuatore rotazionale pneumatico, idraulico o elettromagnetico potrà soddisfare il compito senza importanti effetti sul costo dell'intero robot.

2.3 CONCLUSIONI SUL GIUNTO RICONFIGURABILE

Questo capitolo ha descritto il design funzionale di un giunto riconfigurabile universale. Un cursore con la funzione di switch, che può essere mosso elettronicamente, viene usato per cambiare la configurazione del giunto e quindi possono essere ottenuti due differenti giunti universali. Questa caratteristica può essere sfruttata per realizzare un manipolatore riconfigurabile 3-URU, nel quale i tre giunti universali alla base fissa sono riconfigurabili. Un sistema di ingranaggi è proposto come soluzione meccanica per permettere un efficace ed affidabile cambio di configurazione del giunto. Futuri lavori saranno focalizzati sul design strutturale del giunto, al fine di progettare opportunamente tutti i componenti in termini di dimensioni e materiali; questo studio inizierà dalle analisi statiche e dinamiche dell'intero manipolatore al fine di valutare le forze agenti sul giunto. In questa fase, come vedremo nel prossimo capitolo, parti e ingranaggi del giunto verranno anche realizzate tramite prototipazione rapida, con lo scopo di testare successivamente la loro resistenza e accuratezza quando assemblate in un intero dispositivo.

CAPITOLO 3. LA PROTOTIPAZIONE RAPIDA



3.1 L'ADDITIVE MANUFACTURING

3.1.1 Cos'è l'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM) nasce come evoluzione dei metodi di prototipazione, velocizzando ed ottimizzando un processo realizzato in modo quasi del tutto manuale, dove la costruzione era affidata ad artigiani o modellisti con aumento dei costi e dei tempi di realizzazione. La prototipazione rapida (*rapid prototyping*) è l'insieme delle tecniche industriali rivolte alla realizzazione fisica del prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD). Sono processi con l'obiettivo di ridurre sia i costi di realizzazione che i tempi di costruzione del prototipo stesso.

Tali tecnologie sono state applicate con successo anche in diversi settori industriali, per la produzione di oggetti e attrezzature come componenti per il settore

automotive, della robotica, strumentazione da laboratorio ecc... Le nuove frontiere di utilizzo dell'AM sono il rapid manufacturing¹ e il rapid tooling². L'AM è destinato ad affiancare e/o sostituire le più comuni tecniche di fabbricazione industriale e si prevede un utilizzo sempre più pervasivo e conveniente, con tempi di processo sempre più bassi.

Uno degli elementi peculiari di tutte le tecnologie AM è la possibilità di realizzare, in un unico processo di stampa oggetti che tradizionalmente sono realizzati in diversi componenti singoli, successivamente da assemblare oppure componenti non realizzabili con le tradizionali tecniche di lavorazione. Inoltre, il termine manifattura *additiva* nasce proprio per sottolineare la differenza con la classica manifattura *sottrattiva*: l'AM si basa sulla sovrapposizione di strati di materiale e questo ci permette di limitare notevolmente gli sfridi derivanti dalla lavorazione (Figura 6).

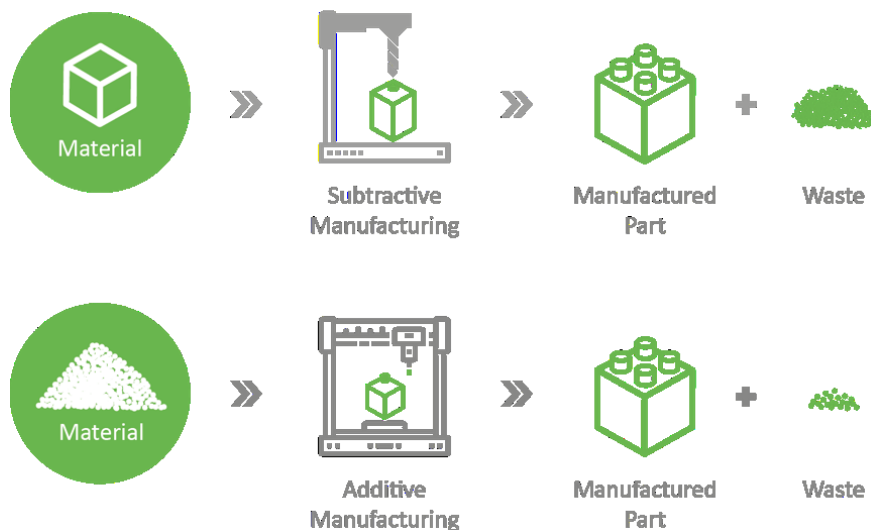


Figura 6. Additive VS Subtractive Manufacturing

¹ Produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente destinati a uso diretto e, a differenza del rapid prototyping, non viene realizzato alcun modello, bensì prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali

² Tecnica che consente, in tempi molto rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico

Tra i principali vantaggi vanno sicuramente inclusi anche la massima leggerezza del componente, grazie alla possibilità di "mettere il materiale solo dove serve", la massima personalizzazione dell'oggetto, nessun costo per la realizzazione di stampi, utensili ed attrezzature di produzione e riduzione dei set-up necessari per passare da un prodotto ad un altro.

3.1.2 Principali tecnologie di Additive Manufacturing

L'AM costituisce una famiglia di tecnologie basate sul principio di funzionamento della stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo l'asse z (cioè verso l'alto), al fine di ottenere un'oggetto tridimensionale. I singoli strati sovrapposti di materiale vengono generati diversamente in base alla tecnologia applicata. Possiamo distinguere 3 macro-famiglie di tecnologie, basate sulle caratteristiche di consistenza della materia prima:

- tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione di *polveri* o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo;
- tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o l'estrusione di un materiale *solido* o semi-solido;
- tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto. Il *liquido* subisce una reazione chimica creando legami tra molecole separate.

L'impiego di una specifica tecnologia è una scelta da effettuare in base ad una serie di parametri quali il tipo di materiale, la resistenza meccanica del pezzo, la finitura superficiale desiderata dal pezzo, la velocità di produzione, l'investimento necessario e il costo finale del pezzo.

L'*ASTM*³ ha suddiviso le tecnologie di fabbricazione additiva nelle seguenti famiglie di processi:

1. *VAT Polymerization*: le principali tecnologie di questa famiglia sono la Stereolithography (SLA) e la Digital Light Processing (DLP). Sfruttando una sorgente luminosa viene attivato il fotopolimero, direzionando il fascio lungo la traiettoria che percorre la sezione dell'oggetto tramite uno specchio in rapido movimento. Il fotopolimero è contenuto in una vasca con una piattaforma orizzontale che supporta la parte e si alza di uno step dopo la solidificazione di ogni strato. Il materiale utilizzato in questa tecnologia è la plastica (polimerizzata);

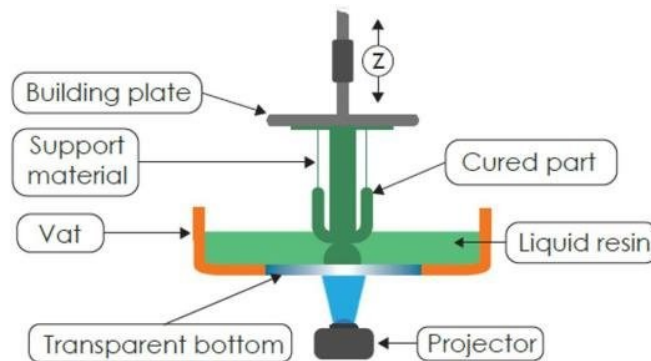


Figura 7. Schema della VAT Polymerization

2. *Material Extrusion*: la principale tecnologia di questa famiglia è la Fused Deposition Modeling (FDM). Della resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido viene depositata, attraverso un'estrusore, su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza. La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la fabbricazione dal basso verso l'alto,

³ American Society for Testing and Materials, organismo di normalizzazione statunitense

sfruttando anche materiale di supporto per evitare il collasso della struttura. Permette inoltre l'utilizzo di materiali per attrezzature avanzate per i settori medico, automobilistico, aerospaziale e alimentare. La finitura superficiale è grezza con strati dei filamenti molto evidenti ma può essere migliorata tramite processi di sabbiatura o abrasione. Possono essere utilizzati sia materiali plastici che compositi;

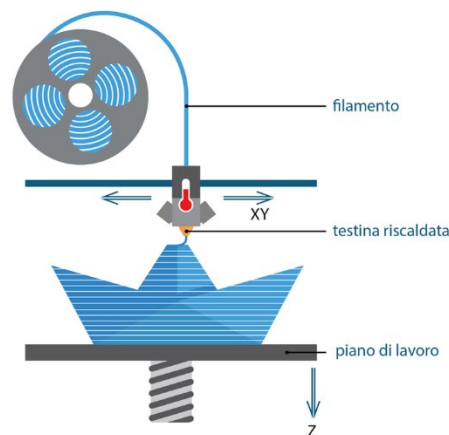


Figura 8. Schema della Material Extrusion

3. *Material Jetting*: le principali tecnologie di questa famiglia sono la Material Jetting Modeling (MJM) e la Photopolymer Jetting (PolyJet). Questo tipo di macchine sono costituite da una testina di stampa simile a quella delle stampanti inkjet. Il materiali si trova allo stato liquido ed è presente anche un secondo materiale, solubile, utilizzato per gli elementi di supporto a perdere. Questa famiglia è caratterizzata da prodotti con un elevato livello estetico e, a seconda del materiale, medie/alte proprietà meccaniche. Il materiale utilizzato è la plastica (polimerizzata);

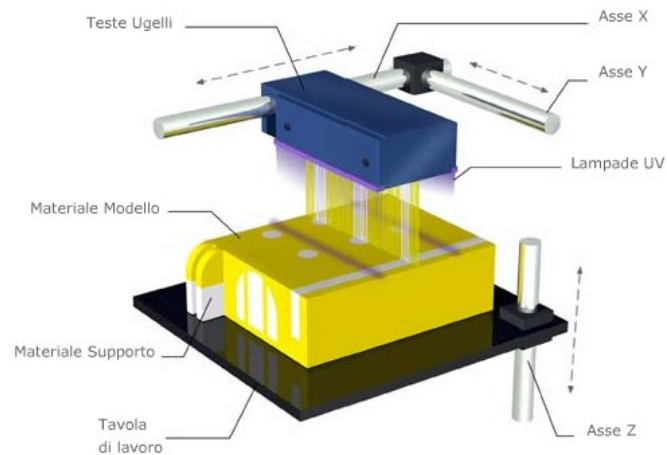


Figura 9. Schema della Material Jetting

4. *Binder Jetting*: viene rilasciato un legante chimico in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere. La polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e viene rimossa al termine del procedimento per essere riutilizzata. Il risultato è un manufatto molto poroso e piuttosto fragile, per questo è una tecnologia più economica delle altre, ma ottimo per essere usato a scopo dimostrativo dato l'elevato livello estetico. I materiali che possono essere utilizzati sono sabbia, plastica e metallo, ovviamente insieme al legante.

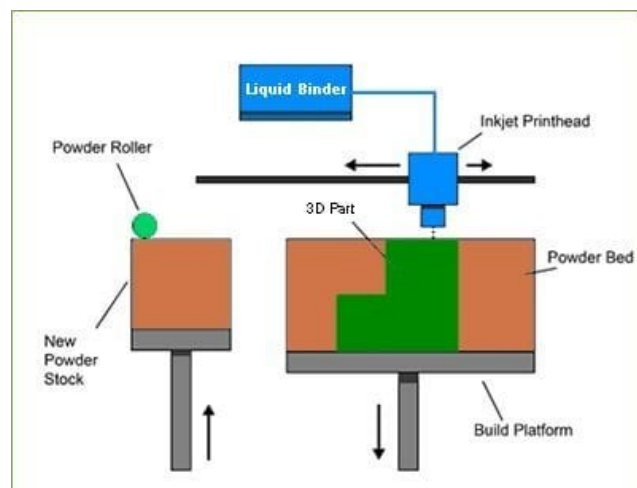


Figura 10. Schema della Binder Jetting

5. *Power Bed Fusion*: le principali tecnologie sono la Selective Laser Sintering (SLS), la Selective Laser Melting (SLM), la Direct Metal Laser Sintering (DMLS) e la Electron Beam Melting (EBM). È un processo che sfrutta energia termica per fondere e solidificare una regione di un letto di polvere, posizionata su un piano mobile in direzione verticale; completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo. La polvere non processata viene riutilizzata. Si utilizza come materiale polvere metallica;

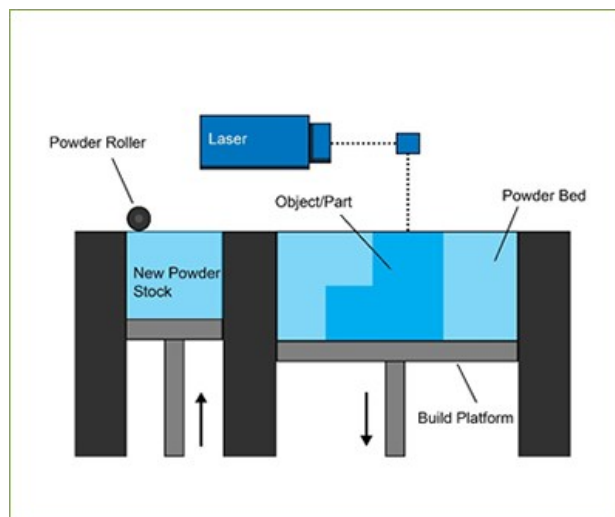


Figura 11. Schema della Power Bed Fusion

6. *Direct Energy Deposition*: la principale tecnologia di questa famiglia è la Laser Metal Deposition (LMD). Abbiamo polvere metallica, gas di protezione e laser erogati simultaneamente attraverso un ugello. La polvere è trasportata da un gas inerte che permette al materiale di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo. L'energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo che si fondono completamente quando entrano in contatto

con il bagno di fusione creando un legame metallico tra la polvere e il substrato. Il materiale utilizzato è polvere metallica.

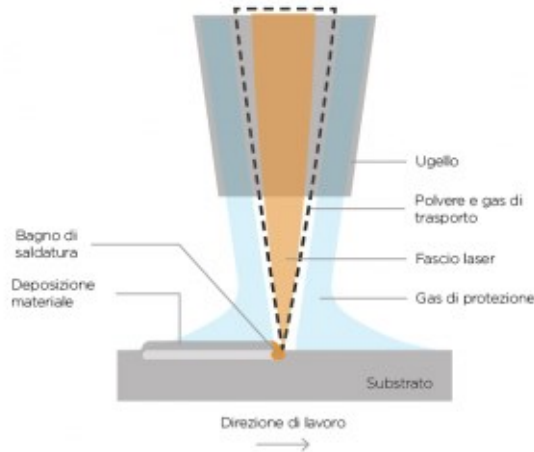


Figura 12. Schema della Direct Energy Deposition

L'additive manufacturing è utilizzato, come precedentemente spiegato, sia per prototipi sia per oggetti finiti o semilavorati; tuttavia la maggior parte delle tecnologie non è in grado di produrre risultati esenti da difetti estetici o che comunque non necessitano di ulteriori lavorazioni. Menzioniamo quindi le operazioni di finitura più frequenti utilizzate nell'AM:

- Rimozione dei supporti (necessari per prevenire il collasso della struttura);
- Assemblaggio (nel caso di oggetto suddiviso in più parti);
- Infiltration (miglioramento delle proprietà meccaniche tramite un rivestimento);
- Sabbiatura (ottenimento di una superficie uniforme tramite sfere di sabbia scagliate mediante aria compressa);
- Mass finishing (sistema vibrante che attua un'azione di lucidatura);
- Vapor smoothing (esposizione del materiale a vapori di solventi);
- Verniciatura (trattamento largamente utilizzato su tutti i tipi di AM);
- Elettroplaccatura (immersione del pezzo in un bagno di ioni con fini estetici).

3.2 LA FORM 3 DI FORMLABS

Fondata nel settembre 2011 dalla collaborazione di 3 imprenditori con un gruppo di studenti dell'MIT⁴ che stavano frequentando un corso chiamato “Come realizzare (quasi) qualsiasi cosa”, *FormLabs*⁵ è un'azienda leader nel campo dello sviluppo delle nuove tecnologie di stampa 3D e nella costruzione e vendita delle stesse assieme ai relativi software e materiali di consumo.

La stampante 3D utilizzata per la prototipazione rapida del giunto riconfigurabile è il modello *Form 3* dell'azienda descritta precedentemente. Questa è una stampante annunciata all'inizio del 2019, pensata principalmente per artisti e progettisti. È una stampante che sfrutta un nuovo tipo di tecnologia SLA, che assicura superfici con finiture più lisce e maggiori dettagli, offrendo anche un'area di stampa maggiore rispetto alle sue sorelle minori. Ulteriori miglioramenti sono stati apportati al sistema ottico, rendendolo più modulare al fine di semplificare le riparazioni, e ai sensori integrati, in grado di assicurare il successo della stampa e l'usabilità. Grazie a tutte queste caratteristiche la *Form 3* si è aggiudicata il premio di *Miglior Stampante in Resina del 2019*.

Insieme alla stampante *FormLabs* fornisce un software gratuito chiamato *PreForm*, progettato per preparare i modelli 3D alla stampa sulle stampanti *Form 1/2/3*. Questo software include l'orientamento automatico del modello e la generazione, anch'essa automatica, delle strutture di supporto.



Figura 13. Logo del brand FormLabs

⁴ Massachusetts Institute of Technology

⁵ <https://formlabs.com/it/>

3.2.1 Specifiche tecniche della Form 3

La stampante Form 3 di FormLabs (Figura 14) è una stampante della famiglia della SLA che, come già precedentemente descritto, sfruttano una fonte di luce, nel caso specifico un fascio laser, per polimerizzare una resina liquida contenuta in una vasca e trasformarla in plastica dura. Questo tipo di materiali termoindurenti e reattivi alla luce sono chiamati *resine*. Nella Form 3 ci si spinge oltre la normale tecnologia SLA e si utilizza un nuovo sistema brevettato chiamato *Low Force Stereolithography* (LFS) che permette una calibrazione intelligente della potenza del laser in base alla struttura del modello riuscendo così a ridurre drasticamente le forze di distacco e quindi a bilanciare accuratezza dei dettagli e velocità di stampa. Il sistema LFS utilizza inoltre una bassa intensità luminosa per la creazione dei supporti agevolandone la rimozione a stampa finita. Anche il motore ottico è di nuova generazione: si chiama *Light Processing Unit* (LPU) ed è un sistema compatto di lenti e specchi che garantisce stampe accurate, omogenee e replicabili. La potenza del laser è pari a 250 mW e si riesce a raggiungere una risoluzione XY di 25 μm (lo spessore dello strato invece può variare tra i 25 e i 300 μm). Il volume di stampa è pari a 14,5 x 14,5 x 18,5 cm. La Form 3 può stampare in 3D senza interruzioni grazie ad un sistema di sensori integrati che monitorano costantemente la performance di stampa, mantengono le condizioni ideali di stampa e inviano notifiche sullo stato della stampante. È inoltre utilizzabile anche una funzione di *Remote Printing*.

I materiali utilizzabili su questa stampante sono molteplici, tra cui resine standard, resine per applicazioni ingegneristiche, resine per gioielli e resine ceramiche. Il passaggio da una resina all'altro è facilitato dall'utilizzo di un sistema di cartucce che possono essere

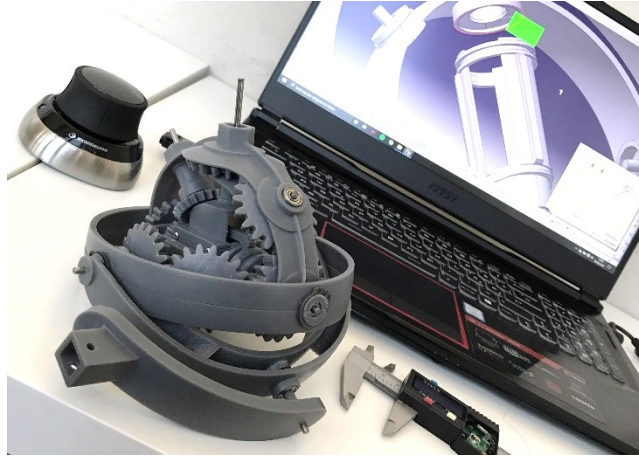
cambiate con estrema facilità in pochi secondi (ricordando di cambiare anche la vaschetta dedicata, ogni resina deve averne una).

La Form 3 è accompagnata da un *Finish Kit*, ovvero un set che include due recipienti di lavaggio e tutti gli strumenti necessari per il post-processing del pezzo stampato, e dal software *PreForm*, sviluppato dall'azienda stessa. Quest'ultimo permette di importare il file CAD, trasformato in STL o in OBJ, e preparare in pochi minuti il modello alla stampa. Gli algoritmi di PreForm impostano automaticamente il layout, l'orientamento e i supporti del pezzo senza la necessità di una formazione specialistica, ciò non toglie ovviamente il fatto che gli utenti esperti possano regolare manualmente una vasta gamma di parametri. Il software permette infine un controllo a 360 gradi dell'operazione di stampa, sia tramite indicazioni sull'utilizzo della resina e del serbatoio, sia tramite dei feedback sulle stampe precedenti volti a migliorare di volta in volta il processo di stampa, il tutto reso possibile da un'interfaccia intuitiva e da avvisi di stato sia sul touchscreen integrato nella Form 3 che sul computer nel quale è installato PreForm.



Figura 14. La Form 3 di FormLabs

CAPITOLO 4. REALIZZAZIONE DEL GIUNTO



4.1 IL PROCESSO DI REALIZZAZIONE

Per la produzione del giunto sferico riconfigurabile descritto nel Capitolo 2 è stato rispettato il processo tipico della manifattura additiva, seguendo cioè 5 passaggi fondamentali:

1. Progettazione di un modello 3D, su software CAD, del modello;
2. Conversione dei file in formato STL, in modo da rendere il modello fruibile dai software per la stampa 3D;
3. Scomposizione dell'oggetto in *layer* (strati) stampabili tramite il software della stampante;
4. Stampa del modello;
5. Processi di post-produzione, finitura e assemblaggio per ottenere adeguati livelli di finitura e proprietà meccaniche del manufatto realizzato.

Nelle prossime sezioni vedremo come sono stati affrontate, nello specifico caso del giunto, queste fasi.

4.1.1 Progettazione CAD

Per la realizzazione fisica del modello è sicuramente fondamentale partire dal modello CAD¹. I principi di realizzazione e di sviluppo del progetto 3D sono stati precedentemente descritti nel Capitolo 2. Successivamente si è passati all'individuazione di tutti i componenti dell'assemblato che dovranno essere poi convertiti e stampati singolarmente.

Riportiamo di seguito un *rendering*² del giunto riconfigurabile estratto dal modello 3D (Figura 15), per mostrare il risultato della progettazione tramite il software CAD, e un *esploso*³ (Figura 16) per una più chiara visualizzazione delle singole parti da stampare, seguito dalla relativa lista dei componenti (in cui abbiamo esplicitato nome e quantità da realizzare).

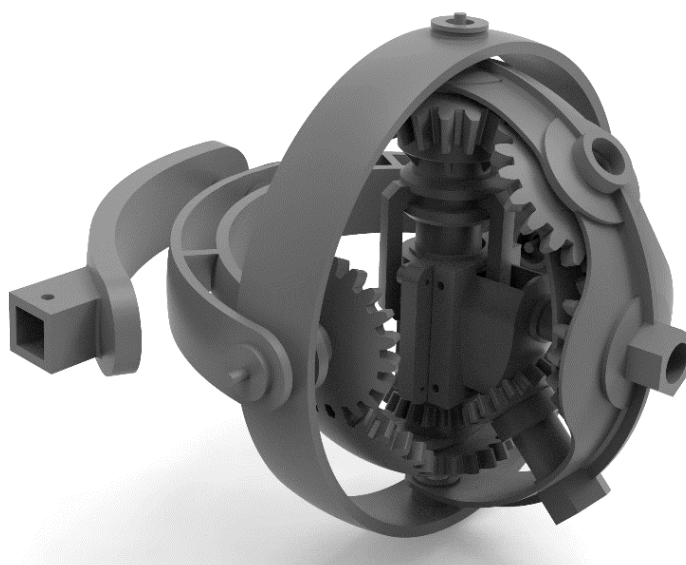


Figura 15. Rendering del modello CAD del giunto

¹ Computer Aided Design (progettazione assistita dal calcolatore) : indica l'utilizzo di software ed in particolare di computer grafica per supportare l'attività di progettazione di manufatti sia virtuali che reali

² Restituzione grafica, cioè la generazione di un'immagine a partire da una descrizione matematica di una scena tridimensionale

³ Rappresentazione grafica condotta in modo che i singoli pezzi vengano nella posizione che assumeranno nel montaggio

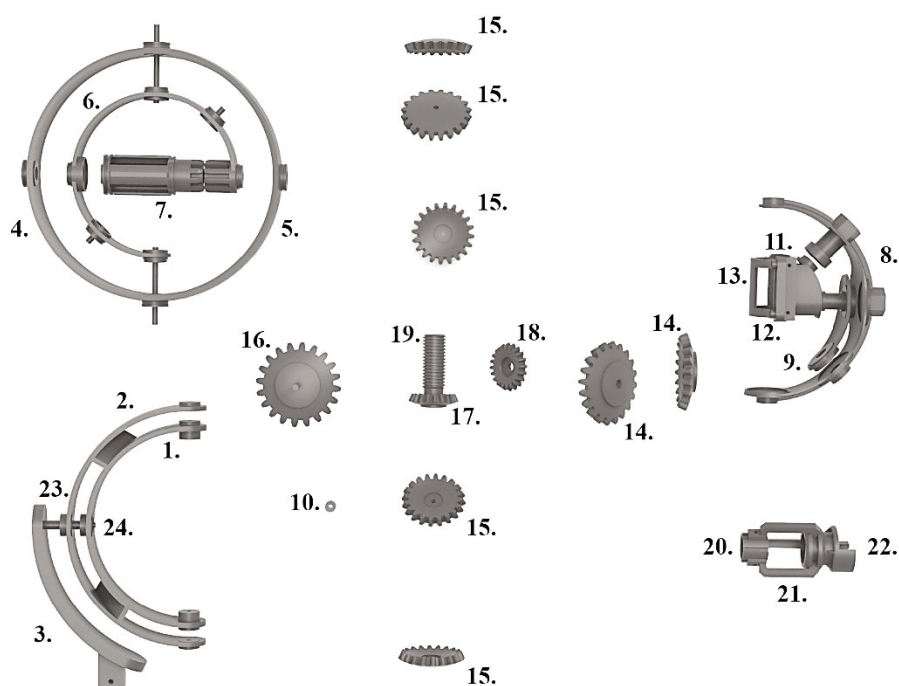


Figura 16. Esploso estratto dal modello CAD del giunto

RIF.	COMPONENTE	QUANTITA'
1	Forchetta INT	1
2	Forchetta EXT	1
3	Innesto braccio	1
4	Culla SX	1
5	Culla DX	1
6	Culla INT	1
7	Anima Corsore	1
8	Telaio	1
9	Cuore Telaio	1
10	Boccola Telaio	1
11	Cassa Corsore INT	1
12	Cassa cursore TOP	1
13	Cassa Corsore INF	1
14	Ruota 3	2
15	Ruota 4	5
16	Ruota 5	1
17	Ruota 6	1
18	Ruota 7	1
19	Vite cursore – ruota 6	1
20	Madrevite cursore	1
21	Supporti cursore	1
22	Ruota dentata cursore	1
23	Spessore forchetta 1	1
24	Spessore forchetta 2	1

4.1.2 Preparazione delle stampe

Una volta completato il modello 3D e individuate tutte i componenti necessarie per la realizzazione del giunto, la prima cosa da fare sicuramente convertire ogni singolo pezzo, esportandolo dal programma CAD tramite un processo semi-automatico, in formato *STL*⁴, ovvero un tipo di file che discretizza il solido in triangoli rendendo la geometria più semplice e leggera anche se leggermente approssimata. A questo punto i file sono diventati utilizzabili all'interno del software PreForm di FormLabs.

Collegando la stampante Form 3 al computer, tramite USB, il programma la riconosce automaticamente e importa tutte le impostazioni di default; in particolare all'apertura possiamo scegliere il tipo di resina (di base sarà indicata la resina presente attualmente nel tank montato all'interno della stampante) e lo spessore dello strato, tuttavia questi fattori potranno anche essere modificati in un secondo momento. Nel nostro caso la resina utilizzata è la Grey V4, molto versatile e studiata per applicazioni ingegneristiche per fornire elevata precisione con deformazioni limitate e basso attrito, mentre lo spessore è stato posto pari a 100 µm, siamo infatti giunti, dopo alcune prove, alla conclusione che questo era il miglior compromesso, per i nostri scopi, tra accuratezza del modello e tempo di stampa (dato che spessore dello strato e tempo di stampa sono inversamente proporzionali).

Successivamente si è passati all'inserimento delle parti nel volume di stampa virtuale: una volta importato il primo pezzo nel software procediamo come prima cosa con l'orientamento (che può essere gestito manualmente o automaticamente) dello stesso.

⁴ STereo Lithography interface format o acronimo di "Standard Triangulation Language"

è importante sapere che è bene posizionare il componente in maniera obliqua rispetto al piano di stampa nel rispetto della tecnologia LFS (descritta nel capitolo precedente) ed infatti questo è proprio quello che fa l'orientamento automatico. L'interfaccia che ci troviamo davanti in questa fase è riportata di seguito (Figura 17).

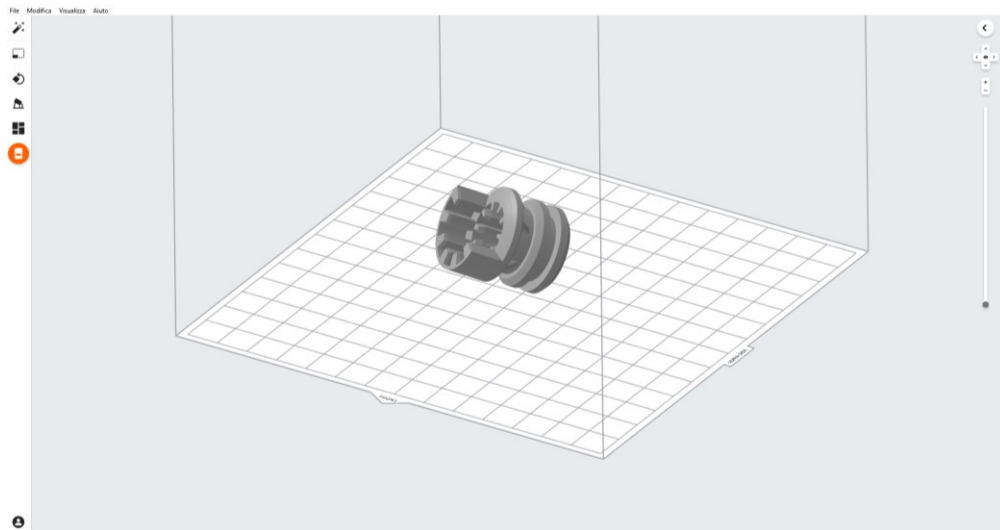


Figura 17. Interfaccia di PreForm dopo l'inserimento del primo componente nel volume di stampa

Il passaggio immediatamente successivo è quello di andare a realizzare i supporti che sosterranno la nostra parte: anche questa fase può essere svolta automaticamente dal software, che crea sia la rete di supporti sia la base di attacco al piatto della stampante con denominazione del pezzo, ma è fondamentale andare poi a modificare manualmente i punti di attacco dei supporti al pezzo. Infatti, nonostante questi rami siano molto sottili, in componenti di piccole dimensioni e con particolari minuziosi come nel nostro caso, se i punti di attacco coincidono con parti funzionali e/o dettagli importanti, questi potrebbero andare a compromettere la geometria del pezzo in fase di rimozione degli stessi, portando allo scarto del componente interessato. Fortunatamente PreForm ci permette di effettuare

questa procedura guidandoci con dei messaggi di errore nel caso in cui il pezzo non sia sufficientemente supportato.

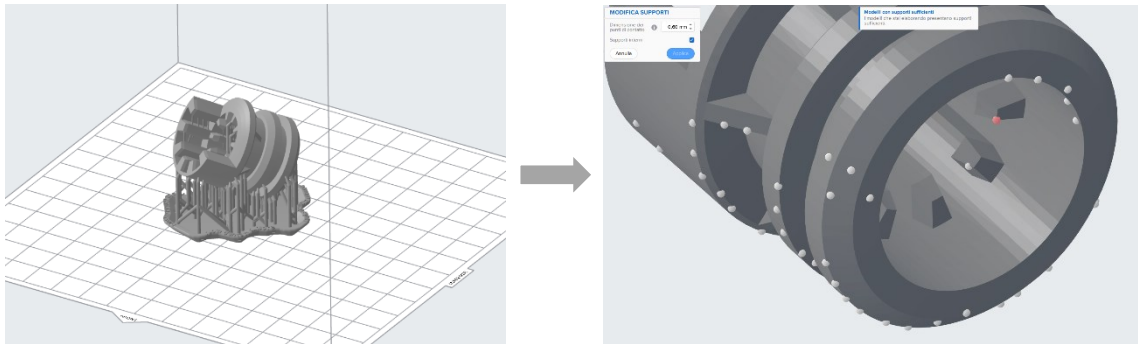


Figura 18. Creazione automatica e modifica manuale dei supporti (in rosso un esempio di punto di attacco da rimuovere e/o spostare)

Possiamo continuare importando nel software altri pezzi fino a riempire il volume di stampa, controllando sempre il tempo stimato di stampa, ripetendo per ogni componente la procedura precedentemente descritta. Inserirli tutti i componenti necessari possiamo passare al layout dell'area di stampa, anche questo automatizzato, per ottimizzare lo spazio occupato e distanziare le parti tra di loro. La situazione finale che ci troviamo davanti alla fine di questa serie di operazioni (Figura 19) è ciò che andremo realmente a realizzare, siamo quindi pronti per la fase successiva: la stampa.

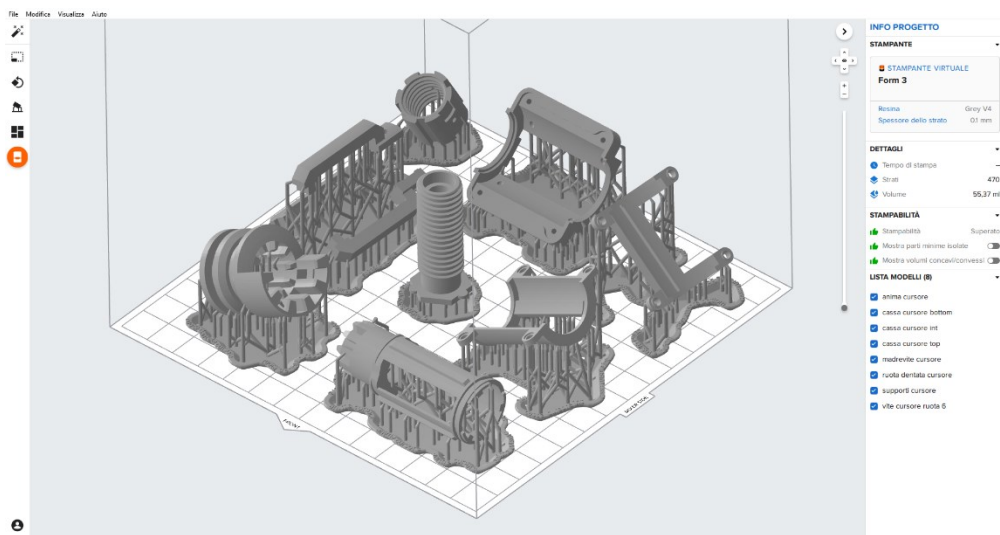


Figura 19. Completamento della preparazione della stampa

4.1.3 Stampa e post-processing

Una volta definita disposizione dei componenti su PreForm dobbiamo preparare la stampante. Innanzitutto, inseriamo nella stampante il serbatoio della resina scelta e il corrispondente vassoio, poi carichiamo il file da stampare sulla Form 3: è importante chiudere sempre lo sportello della stampante e non lasciare la resina esposta alla luce perché potrebbe solidificarsi, proprio per questo le pareti della Form 3 costituiscono un filtro che evitano che questo accada. Una volta importato il file la stampante fa una serie di operazioni preliminari per prepararsi alla stampa, in particolare:

- riempie il vassoio con la giusta quantità di resina necessaria (calcolata dal software in base al volume di componenti e supporti)
- riscalda l'ambiente interno della stampante fino ad una temperatura di 35°C
- prepara il vassoio e la piattaforma di stampa

A questo punto inizia il processo di stampa. Nel caso specifico sono stati preparati tutte stampe da circa 6 ore ciascuna e, per realizzare tutti i componenti di un singolo giunto sferico riconfigurabile sono state necessarie 7 stampe.

Terminata la stampa i pezzi si troveranno attaccati alla piattaforma (Figura 20) e la Form 3 mostrerà un avviso che ci indica che possiamo rimuoverla e spostarci su una postazione dove abbiamo precedentemente posizionato il finish kit e cioè dove effettueremo tutte le operazioni di finitura.



Figura 20. Termine processo di stampa

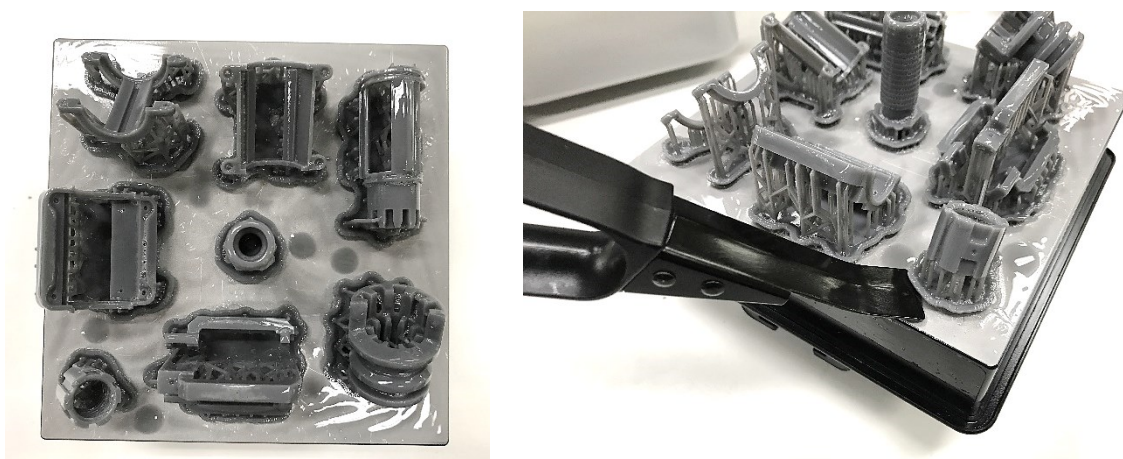


Figura 21. Piattaforma di stampa sul piano di lavoro e distacco pezzi dalla piattaforma

La prima cosa da fare è sicuramente staccare tutti i componenti dalla piattaforma di stampa (Figura 21): questo processo va fatto con la massima cura per evitare di danneggiare sia i pezzi, che in questa fase sono ancora “freschi” e “morbidi”, sia la piattaforma che deve rimanere liscia per garantire un’elevata qualità di stampa. I pezzi possono essere poggiati sul vassoio delle vasche di pulizia: queste non sono altro che due contenitori identici (il primo utilizzato per una pulizia più grossolana mentre il secondo per una più fine) di alcool isopropilico⁵ utilizzate per la rimozione, tramite immersione e movimentazione manuale (Figura 22), della resina liquida in eccesso rimasta attaccata ai componenti stampati. I pezzi devono rimanere all’interno del bagno d’alcool per circa 15 minuti per ogni vasca, alternando momenti di “riposo” a momenti di lavaggio manuale tramite il vassoio. È importante chiudere sempre ermeticamente le due vasche per evitare che l’alcool evapori. Mentre i pezzi sono immersi per il distacco della resina liquida, possiamo pulire la piattaforma di stampa (Figura 23): questa operazione è volta all’eliminazione della resina residua e viene fatta manualmente tramite l’utilizzo di un

⁵ Un alcool che dissolve la resina liquida e quindi particolarmente efficace per il lavaggio delle parti realizzate con le stampanti SLA

alcool uguale a quello presente nelle vasche di pulizia e della carta assorbente. Questo passaggio va fatto ogni volta che viene utilizzata la stampante perché la superficie di stampa deve essere perfettamente pulita e quindi richiede notevole cura.

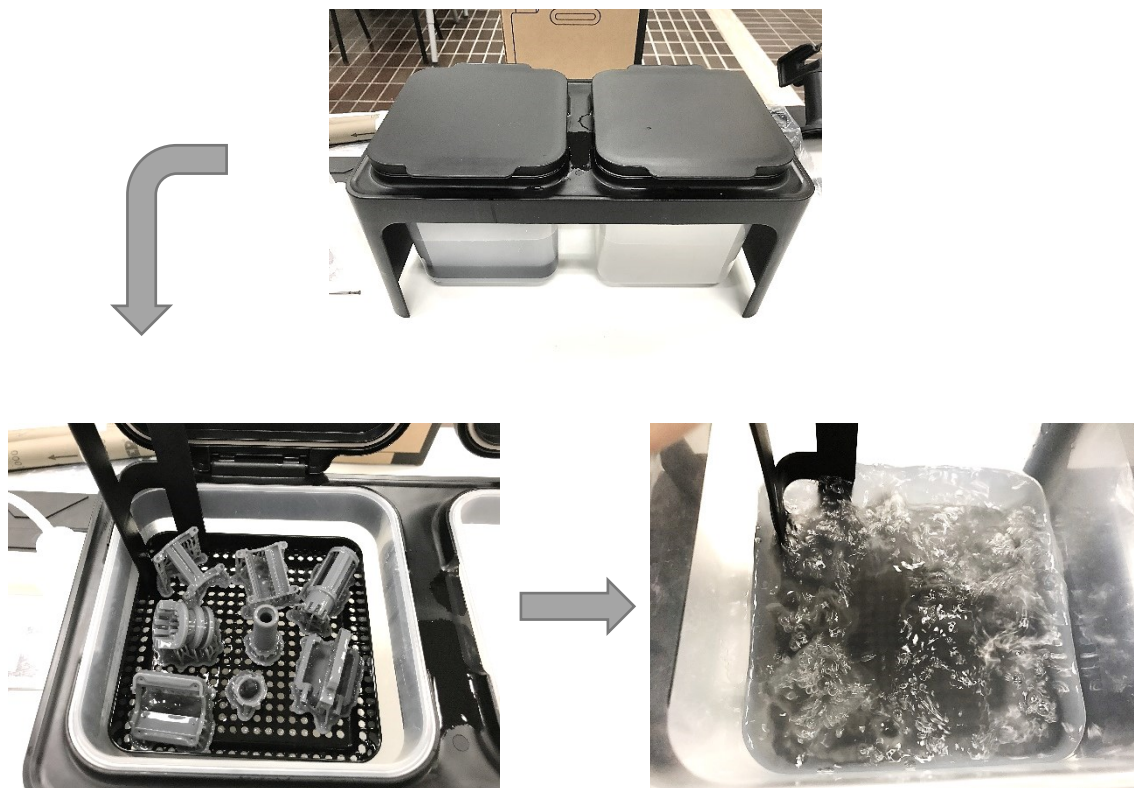


Figura 22. Pulizia dei componenti nelle vasche di alcool isopropilico

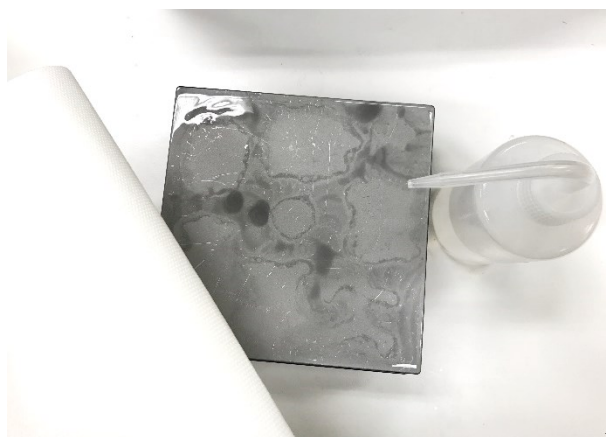


Figura 23. Pulizia della piattaforma di stampa con alcool e carta assorbente

REALIZZAZIONE DEL GIUNTO

Una volta tolti i componenti dalle vasche è necessario lasciarli asciugare (Figura 24) per qualche minuto per far evaporare l'alcool in eccesso. Nel frattempo, accendiamo un particolare forno, il BB Cure⁶, in modo da farlo preriscaldare. Questo polimerizzatore agisce tramite l'azione del calore (viene fatto riscaldare fino a $50\div 60^{\circ}\text{C}$) e dei raggi UV che avvolgono i pezzi in resina e polimerizza la resina che non si era perfettamente solidificata durante la stampa. Inseriamo quindi, una volta asciugati, i componenti nel BB Cure (Figura 25) e aspettiamo, per circa un'ora, che completino il processo di polimerizzazione della resina.



Figura 24. Componenti stampati lasciati ad asciugare

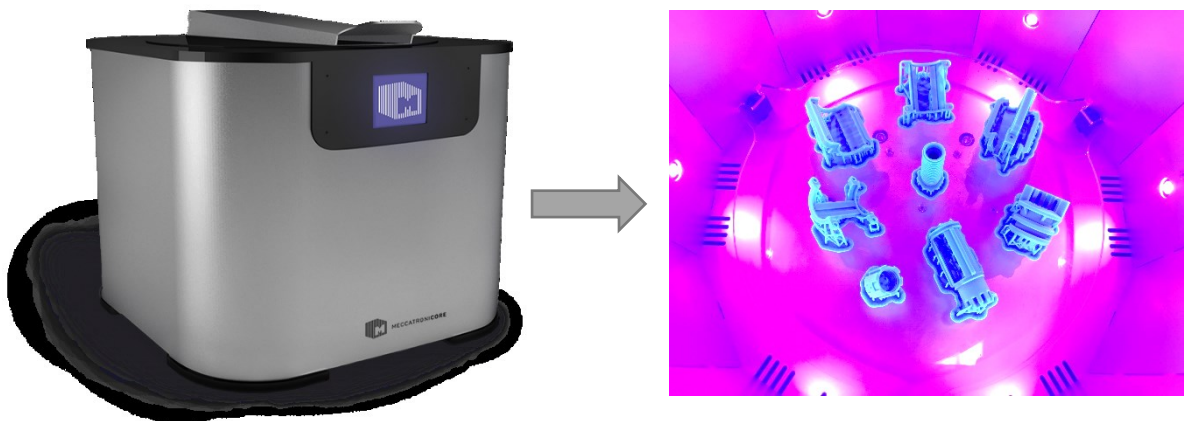


Figura 25. Il forno BB Cure (a sinistra) e i componenti stampati all'interno del forno (a destra)

Una volta usciti dal forno i pezzi risulteranno induriti e con le caratteristiche meccaniche desiderate. Possiamo procedere con la rimozione manuale dei supporti (Figura 26): questa operazione viene fatta tramite delle apposite tronchesi che ci permettono di lavorare facilmente su piccoli componenti ed evitare di danneggiare i pezzi.

⁶ Forno polimerizzatore di MeccatroniCore progettato appositamente per il trattamento e la finitura delle resine per la stampa 3D

Da questa fase possiamo notare la quantità, ridotta, di sfridi provenienti dal processo di stampa 3D (Figura 27), dovuti praticamente solo ai supporti e al basamento.



Figura 27. Rimozione dei supporti tramite le apposite tronchesi

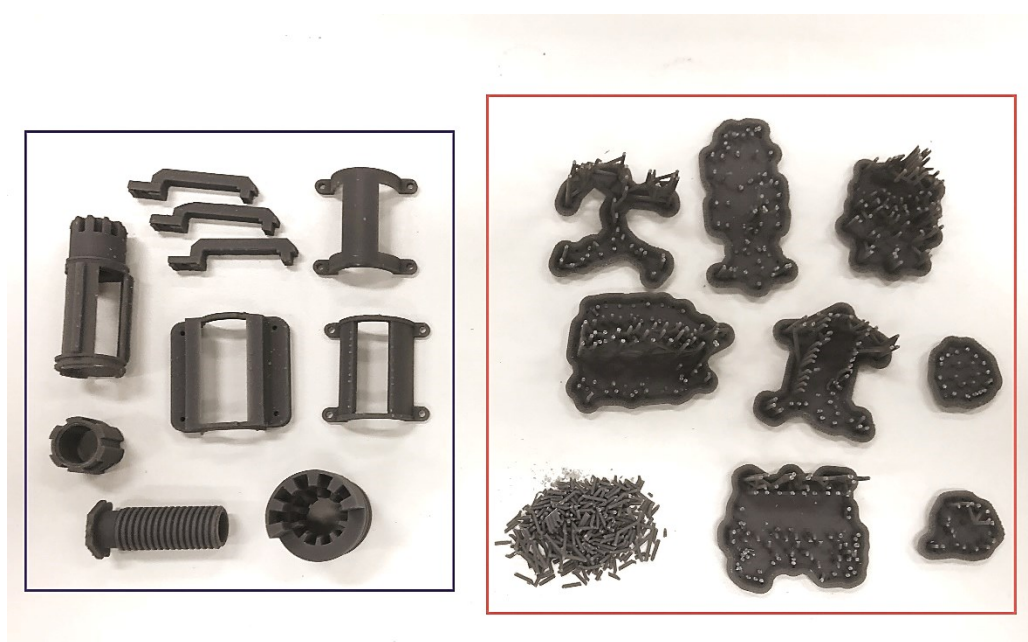


Figura 26. Componenti (a sinistra) e i relativi sfridi di lavorazione (a destra)

L'ultima fase della post-produzione dei singoli pezzi consiste nella rimozione di piccole imperfezioni sulla superficie degli stessi, dovute principalmente ai supporti, soprattutto per rendere regolari le parti funzionali di ogni componente: in questa operazione viene utilizzata carta vetrata con grana fine (1000÷1200) e si procede manualmente alla lavorazione (Figura 28).

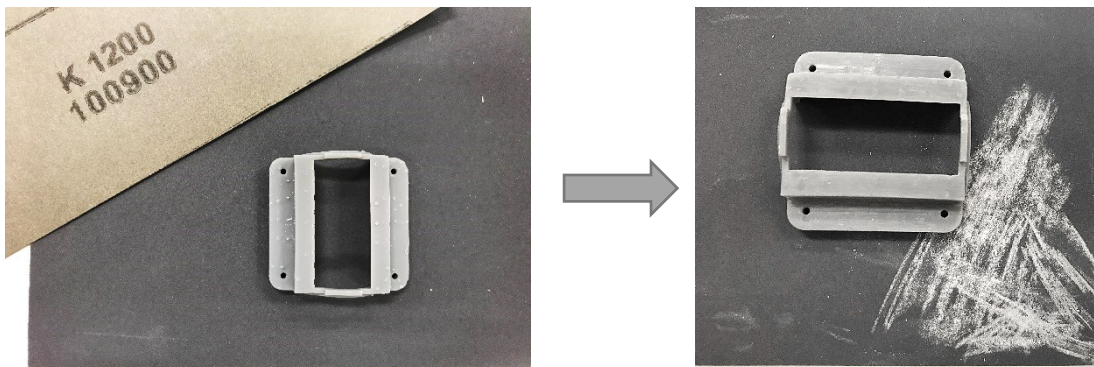


Figura 28. Carteggiatura componenti

4.1.4 Assemblaggio

Una volta stampati e post-prodotti tutti i componenti la situazione che ci troviamo davanti è illustrata in Figura 29 (nel caso specifico i pezzi illustrati sono per la realizzazione di due giunti sferici riconfigurabili).



Figura 29. Tutti i componenti stampati (per due giunti)

Lo step successivo è l'assemblaggio; innanzitutto dobbiamo procurarci tutte le parti necessarie al giunto che non erano incluse nella stampa, ovvero:

- cuscinetti a sfere
- alberi
- bulloni, viti e dadi
- seeger

Per il montaggio del giunto si partirà dalla parte più interna, ovvero dal cursore, procedendo via via con i componenti più esterni fino ad arrivare al completamento del manufatto (Figura30). Riportiamo di seguito la sequenza di montaggio di tutte le parti del giunto, con riferimento alla numerazione dei componenti riportata in 4.1.1:

1. si parta dal centro di tutto il giunto, ovvero dal cursore; montiamo per prima la *madrevite cursore (n.20)* inserendola all'interno dell'*anima cursore (n.7)* in modo da rendere visibili i fori presenti sul corpo 20;
2. Successivamente possono essere collegati tramite viti, sui fori sopra citati, i tre *supporti cursore (n.21)*, lasciando le estremità libere dalla parte dove il corpo 7 presenta la dentatura, e poi fatti combaciare, nella loro estremità libera, con la scanalatura presente sul la *ruota dentata cursore (n.22)*, lasciando la parte dentata di quest'ultima verso l'esterno;
3. Possiamo allora incollare la testa della *vite cursore (n.19)* alla *ruota 6 (n.17)* e inserire il tutto all'interno dell'assemblato, avvitando cioè la vite nel corpo 20;
4. Creiamo ora il case che conterrà il cursore e che lo collegherà solidamente al telaio: posizioniamo la *cassa cursore INT (n.11)* all'interno della *cassa cursore*

INF (n.13), sfruttando gli appositi riferimenti. Dopodiché inseriamo l'assieme montato precedentemente all'interno di questi e chiudiamo, utilizzando delle viti nei fori già presenti sui componenti, con la *cassa cursore TOP (n.12)*. Infine, inseriamo il tutto nel *cuore telaio (n.9)* anche quindi sfruttando i fori già esistenti e delle viti, lasciando la ruota 6 dalla parte della "gobba" del componente 9;

5. Colleghiamo l'assemblato alla *culla INT (n.6)*, nella posizione illustrata in Figura 16, facendo combaciare la ruota 6 con l'alloggiamento apposito sul corpo 6 e la parte dentata del corpo 6 con la dentatura del corpo 22;
6. Inseriamo tutte le ruote dentate possibili sulla parte assemblata con i relativi cuscinetti e alberi, in particolare: la *ruota 7 (n.18)* va sull'alloggiamento sulla "gobba" del componente 9; sempre sul componente 9 ma sulla parte esterna vanno inserite le due *ruote 3 (n.14)*; seguendo lo stesso ordine che segue la trasmissione tra le ruote, posizioniamo la *ruota 5 (n.16)* in corrispondenza del componente 22; in tutti gli altri alloggiamenti disponibili sul componente 6 andranno posizionate, esternamente, tutte e 5 le *ruota 4 (n.15)*;
7. Inseriamo a questo punto il *telaio (n.8)* facendo attenzione a far combaciare l'ingresso del motore con il componente 14 superiore e l'ingresso del selettore con il componente 18. Viene anche utilizzato la *boccola telaio (n.10)* per distanziare il componente 8 dal 15;
8. Costruiamo ora la culla ma senza inserirla nell'assieme; essa è composta da due parti: la *culla SX (n.4)* e la *culla DX (n.5)*. Questo componente circonda tutto il corpo precedentemente assemblato, e vengono collegate tra di loro sfruttando

opportuni riferimenti e tenute insieme tramite 4 seeger; durante l'operazione di chiusura vanno inseriti 4 cuscinetti negli appositi spazi;

9. L'ultimo componente da realizzare è la forchetta: facciamo combaciare la *forchetta EXT (n.2)* con la *forchetta INT (n.1)* tramite i riferimenti presenti in corrispondenza delle nervature. Inseriamo ora l'albero dell'*innesto braccio (n.3)*, componente che collegherà il giunto al braccio del robot, e i cuscinetti nei fori centrali delle due forchette utilizzando lo *spessore forchetta 1 (n.23)* e lo *spessore forchetta 2 (n.24)* per il corretto distanziamento;
10. Infine, uniamo l'assieme culla con l'assieme forchetta (realizzati nei punti 8 e 9) e colleghiamo poi il tutto all'assemblato principale, in modo che la forchetta sia posizionata perpendicolarmente rispetto all'asse del cursore centrale.



Figura 30. Il giunto sferico riconfigurabile completato

CONCLUSIONE E LIMITI

5.1 SVILUPPI FUTURI E PROBLEMATICHE RISCONTRATE

Come descritto nei capitoli precedenti di questa tesi il giunto realizzato dovrà essere assemblato e utilizzato, insieme a altri due giunti identici, all'interno del robot 3-URU. Riportiamo quindi in quest'ultima sezione un focus sulle problematiche riscontrate e sugli sviluppi futuri che riguarderanno il giunto.

5.1.1 Sviluppi Futuri

Innanzitutto, come già descritto nel paragrafo 2.3, il passaggio immediatamente successivo è quello di progettare le altre parti facenti parte del robot, studiando in particolar modo il design strutturale (quindi dimensionamento e scelta dei materiali). Lo studio delle forze, sia statiche che dinamiche, agenti sul robot è altresì utile allo studio dei due attuatori presenti su ogni giunto, che dovranno essere opportunamente scelti. Infine, si potrà passare all'assemblaggio finale di tutto il robot e quindi al collaudo, anche per valutare la qualità dei componenti realizzati tramite additive manufacturing ed evidenziarne gli aspetti critici.

5.1.2 Problematiche riscontrate

I componenti prodotti, illustrati in Figura 29, sono tutti quelli necessari per la realizzazione completa di due giunti, tuttavia particolare attenzione va dedicata alla coppia vite-madrevite del cursore (componenti n.19 e 20) in quanto stampando in 3D il pezzo come da CAD la coppia non funziona come dovrebbe e quindi impedisce il funzionamento di tutto il giunto; provando ad aumentare la qualità della stampa, ovvero

diminuendo la grandezza dello strato stampato da 100 μm a 50 μm , non c'è stato un miglioramento nel funzionamento, quindi si è passati alla ri-modellazione della filettatura sul modello CAD assottigliandola: con questa strada ci sono stati notevoli miglioramenti perciò per il corretto funzionamento si procederà diminuendo ancora di più la dimensione del dente della filettatura.

Altre problematiche, seppur di minore importanza, sono principalmente legate alle prime criticità notate su questo tipo di prototipazione. In generale si nota una notevole fragilità delle componenti con piccoli dettagli, i quali rischiano di scheggiarsi e/o rompersi durante la rimozione dei supporti o anche durante l'assemblaggio. Inoltre, nel caso specifico abbiamo notato che sarebbe meglio sostituire l'alberino (stampato già solidale al pezzo) del componente n.3 con un albero in acciaio come quelli usati nelle altre parti del giunto.

Per migliorare la solidità di alcune parti del giunto inoltre sarà opportuno valutare la possibilità di incollare tra loro dei pezzi al posto dell'utilizzo di viti, che potrebbero compromettere il componente, o al posto di un semplice vincolo di incastro, come accade tra il componente n.21 e 22, il quale può risultare insufficiente per la stabilità e il corretto funzionamento di suddette parti.

BIBLIOGRAFIA

- Chablat, D.; Wenger, P. *Working modes and aspects in fully parallel manipulators*. In Proceedings of the IEEE 1998 International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 20–20 May **1998**; Volume 3, pp. 1964–1969.
- Chablat, D.; Kong, X.; Zhang, C. *Kinematics, workspace and singularity analysis of a multi-mode parallel robot*. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August **2017**; Volume 5A.
- Au, W.; Chung, H.; Chen, C. *Path planning and assembly mode-changes of 6-DOF Stewart-Gough-type parallel manipulators*. Mech. Mach. Theory **2016**, 106, 30–49.
- Tian, C.; Fang, Y.; Guo, S.; Qu, H. *A class of reconfigurable parallel mechanisms with five-bar metamorphic linkage*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C **2017**, 231, 2089–2099.
- Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. *Reconfigurability and unified kinematics modeling of a 3Rtps metamorphic parallel mechanism with perpendicular constraint screws*. Robot. Comput. Integr. Manuf. **2013**, 29, 121–128.
- Khalid, A.; Mekid, S. *Design synthesis of a three legged SPS parallel manipulator*. In Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, Manchester, UK, 14–16 July **2010**; pp. 169–173.

- Ye, W.; Fang, Y.; Guo, S. *Structural synthesis of a class of metamorphic parallel mechanisms with variable mobility*. In *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*; Springer: London, UK, **2012**; pp. 119–126.
- Finistauri, A.; Xi, F. *Reconfiguration analysis of a fully reconfigurable parallel robot*. *J. Mech. Robot.* **2013**, 5, 041002.
- Grosch, P.; Di Gregorio, R.; López, J.; Thomas, F. *Motion planning for a novel reconfigurable parallel manipulator with lockable revolute joints*. In *Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, AK, USA, 3–7 May **2010**; pp. 4697–4702.
- Taherifar, A.; Alasty, A.; Salarieh, H.; Boroushaki, M. *Path planning for a hyper-redundant manipulator with lockable joints using PSO*. In *Proceedings of the First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, Tehran, Iran, 13–15 February **2013**; pp. 224–229.
- Aukes, D.; Heyneman, B.; Ulmen, J.; Stuart, H.; Cutkosky, M.; Kim, S.; Garcia, P.; Edsinger, A. *Design and testing of a selectively compliant underactuated hand*. *Int. J. Robot. Res.* **2014**, 33, 721–735.
- Xi, F.; Li, Y.; Wang, H. *A module-based method for design and analysis of reconfigurable parallel robots*. In *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Xi'an, China, 4–7 August **2010**; pp. 627–632.
- Zhang, T.; Zhang, W.; Gupta, M. *An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution*. *Mech. Mach. Theory* **2018**, 124, 248–258.

- Yang, H.; Baradat, C.; Krut, S.; Pierrot, F. *An agile manufacturing system for large workspace applications*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. **2016**, 85, 25–35.
- Zhang, W.J. *A new class of linkage with synthesis method for exact dwell motion at 1 and/or 2 limit positions of output link*. In Proceedings of the 24th ASME Mechanisms Conference, Irvine, CA, USA, 18–22 August **1996**; pp. 1–5.
- Chen, W.; Zhang, J.; Quan, J.; Lv, T. *A novel spherical joint designed for metamorphic mechanism*. In Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Chengdu, China, 21–24 September **2008**; pp. 976–981.
- Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. *Reconfiguration and static joint force variation of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with 3R and 1T2R motion*. Mech. Mach. Sci. **2016**, 36, 213–222.
- Zhang, T.; Zhang, W.J.; Gupta, M.M. *A Novel Docking System for Modular Self-Reconfigurable Robots*. Robotics **2017**, 6, 25.
- Yuan, C.W.; Yin, R.X.; Zhang W.J.; Chen, G. *A new under-actuated resilient robot*. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff, AB, Canada, 5–8 October **2017**; pp. 1202–1207.
- Carbonari, L.; Callegari, M. *The kinematotropic 3-CPU parallel robot: Analysis of mobility and reconfigurability aspects*. In Latest Advances in Robot Kinematics; Springer: Berlin, Germany, **2012**; pp. 373–380.

- Carbonari, L.; Callegari, M.; Palmieri, G.; Palpacelli, M.C. *A new class of reconfigurable parallel kinematic machines*. Mech. Mach. Theory **2014**, 79, 173–183.
- Palpacelli, M.C.; Carbonari, L.; Palmieri, G. *Details on the design of a lockable spherical joint for robotic applications*. J. Intell. Robot. Syst. **2016**, 81, 169–179.
- Palpacelli, M.; Carbonari, L.; Palmieri, G.; Callegari, M. *Mobility analysis of non-overconstrained reconfigurable parallel manipulators with 3-CPU/3-CRU kinematics*. In Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II; Springer: Berlin, Germany, **2016**; pp. 189–200.
- Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.C.; Palmieri, G.; Callegari, M. *Functional Design and Optimization of a Novel 3-URU Multimodal Reconfigurable Robot*. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August **2017**; p. V009T07A050.
- Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.; Palmieri, G.; Callegari, M. *A novel reconfigurable 3-URU parallel platform*. In Proceedings of the International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, Torino, Italy, 21–23 June **2017**; pp. 63–73.
- Palpacelli, M.; Carbonari, L.; Palmieri, G.; Callegari, M. *Design of a Lockable Spherical Joint for a Reconfigurable 3-URU Parallel Platform*. In Robotics, MDPI; Ancona, Italy, Department of Industrial Engineering and Mathematical Sciences, Polytechnic University of Marche; 2 August **2018**.

SITOGRAFIA

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Formlabs>
- <https://formlabs.com/it/>
- <https://www.3ditalyshop.it/prodotto/stampanti-3d/formlabs/formlabs-form-3-complete-package/>
- <https://formlabs.com/it/blog/guida-definitiva-stampa-3d-stereolitografia-sla/>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/CAD>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Rendering>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/STL_\(formato_di_file\)](https://it.wikipedia.org/wiki/STL_(formato_di_file))
- <https://support.formlabs.com/s/article/Using-Grey-Pro-Resin?language=it>
- <https://support.formlabs.com/s/article/Isopropyl-Alcohol-IPA?language=it>
- <http://www.meccatronicore.com/bb-cure-dental/>

RINGRAZIAMENTI

Questa tesi per me è il frutto di tanti sforzi e sacrifici fatti in questi tre anni, tutti mossi dalla passione per l'ingegneria e dalla continua voglia di apprendere nuove cose. Desidero innanzitutto ringraziare la mia famiglia, papà Gianni, mamma Paola e mia sorella Michela, che mi hanno supportato sotto tutti i punti di vista, non mi hanno mai fatto mancare nulla e soprattutto mi hanno sempre spronato e incoraggiato, e nonna Clara, che riesce in ogni occasione a darmi la forza ed è da sempre la roccia su cui sono sempre sicuro di potermi poggiare. Un grazie va ad Ilaria, che mi ha fatto sentire a casa ogni volta che tornavo nella mia città. Devo anche ringraziare tutti coloro che sono stati in miei compagni di viaggio, in particolar modo i miei coinquilini Pietro, Andrea e Mario, con i quali ho condiviso tante esperienze in quella che è stata la nostra seconda casa per questi anni, i miei amici di sempre che ci sono stati per me e con i quali passavo i fine settimana, i miei musicisti Jacopo e Samuele con i quali ho condiviso tante emozioni che siamo riusciti a trasformare in musica, i miei compagni di corso con i quali ho trascorso tanto tempo dentro e fuori l'università, e tutti i miei colleghi del Polimarche Racing Team che hanno reso la mia permanenza all'università sicuramente più intensa e interessante. Infine, ci tenevo a ringraziare l'Università Politecnica delle Marche, il gruppo di "Meccanica Applicata alle Macchine" del dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze matematiche e, in particolar modo, il prof. Ing. Matteo Claudio Palpacelli e l'Ing. Daniele Costa, che mi hanno permesso di effettuare il tirocinio descritto in questa tesi e mi hanno seguito sempre con molta disponibilità, professionalità e passione nel trasmettermi tutte le nozioni necessarie.

Marco Popazzi

