



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE MATEMATICHE

Corso di Laurea triennale: **Ingegneria meccanica**

***PROGETTAZIONE MECCANICA DI UN ROBOT
MOBILE OMNIDIREZIONALE***

***MECHANICAL DESIGN OF AN OMNIDIRECTIONAL
MOBILE ROBOT***

Relatore:

Prof. Luca Carbonari

Tesi di Laurea di:

Alessandro Bolognini

A.A. 2022 / 2023

SOMMARIO

<i>ELENCO TABELLE</i>	4
<i>ELENCO FIGURE</i>	5
<i>ELENCO TAVOLE TECNICHE</i>	7
<i>INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI</i>	8
1.1 ROBOT MOBILE OMNIDIREZIONALE	8
1.2 SCOPO DELLA TESI	10
<i>SPECIFICHE DI PROGETTO</i>	11
2.1 SPECIFICHE GENERALI DEL ROBOT	11
2.2 AZIONAMENTI: MOTORE E RIDUTTORE	12
2.3 SISTEMA MECCATRONICO	13
2.3.1 MICROCONTROLORE	14
2.3.2 DRIVER	15
2.3.3 ENCODER	16
2.3.4 CONVERTITORE DC/DC	16
2.3.5 BATTERIA	17
2.4 UR5e	18
<i>PROGETTAZIONE CHASSIS</i>	19
3.1 PROFILI SCELTI	21
3.2 GEOMETRIA	23
3.3 COMPONENTI PER IL FISSAGGIO	24
3.4 BASE PER IL SOSTEGNO DEI COMPONENTI ELETTRONICI	26
<i>PROGETTAZIONE COMPONENTI MECCANICI</i>	27
4.1 SUPPORTO AZIONAMENTI	27
4.2 SUPPORTO CUSCINETTI	28
4.3 ALBERO DI TRASMISSIONE AZIONAMENTI-RUOTE	30
4.4 ALBERO DI COLLEGAMENTO CHASSIS	30
4.5 DIMENSIONAMENTO CUSCINETTI	31
4.6 GIUNTO FLESSIBILE	32
<i>CONCLUSIONE</i>	34
5.1 CARATTERISTICHE RICHIESTE	34

5.2 PROBLEMI RISCONTRATI, RISULTATI OTTENUTI E DISCUSSIONE	34
5.3 OPERAZIONI SUCCESSIVE _____	36
<i>DISTINTA COMPONENTI</i> _____	37

ELENCO TABELLE

Tabella 1, Dati tecnici motore Maxon Motors _____	12
Tabella 2, Dati tecnici riduttore Maxon Motors _____	13
Tabella 3, Dati encoder Maxon Motors _____	16
Tabella 4, Caratteristiche generali profilo Alutec103038 _____	23
Tabella 5, Caratteristiche generali profilo Alutec 103068 _____	23
Tabella 6, Dati angolare di fissaggio _____	25
Tabella 7, Fissaggio a nottolino semplice _____	25
Tabella 8, Viti M8 _____	25
Tabella 9, Dado M8 _____	25
Tabella 10, Dimensioni W208R-2Z _____	32
Tabella 11, Dati di calcolo W208 R-2Z _____	32

ELENCO FIGURE

Figura 1, Morfologia omni wheel	8
Figura 2, Morfologia meccanum wheel	9
Figura 3, Modello semplificato del robot	9
Figura 4, Dimensioni del robot	11
Figura 5, Motore Maxon Motors	12
Figura 6, Riduttore Maxon Motors	13
Figura 7, Schema mecatronico	14
Figura 8, Microcontrollore Teensy 3.5	15
Figura 9, Driver Pololu Dual G2 HP	15
Figura 10, Encoder Maxon Motors	16
Figura 11, Convertitore DC/DC	17
Figura 12, Batterie LiPo da 3,7 V	18
Figura 13, UR5e	18
Figura 14, Primo modello chassis (I)	19
Figura 15, Primo modello chassis (II)	19
Figura 16, Secondo modello chassis (I)	20
Figura 17, Secondo modello chassis (II)	20
Figura 18, Terzo modello chassis	21
Figura 19, Sezione telaio	21
Figura 20, Profilo Alutec 103068	22
Figura 21, Profilo Alutec 103038	22
Figura 22, Dimensione telaio (I)	24
Figura 23, Dimensione telaio (II)	24
Figura 24, Fissaggio angolare	25

Figura 25, Fissaggio a nottolino semplice	25
Figura 26, Base per il sostegno dei componenti elettronici	26
Figura 27, Supporto cuscinetto versione precedente	29
Figura 28, Montaggio albero di trasmissione	30
Figura 29, Cuscinetto W208 R-2R	31
Figura 30, Accoppiatore Ruland a fascio	33
Figura 31, Accoppiatore Ruland Oldham	33
Figura 32, Accoppiatore flessibile	33
Figura 33, Robot (I)	35
Figura 34, Robot (II)	35
Figura 35, Robot (III)	35
Figura 36, Robot (IV)	35
Figura 37, Robot (V)	36

ELENCO TAVOLE TECNICHE

Tavola tecnica 1, Supporto azionamenti_____	28
Tavola tecnica 2, Supporto cuscinetti_____	29
Tavola tecnica 3, Albero di collegamento chassis_____	30

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La robotica è un ramo della scienza che si occupa di progettazione, costruzione e funzionamento di tutte le componenti di un robot. Sebbene ci siano già stati grandi progressi finora in ambito tecnologico, la robotica è un campo ancora giovane e in pieno sviluppo soprattutto per le potenzialità che offre. Ovviamente quando si pensa a dei robot, automaticamente si è portati a pensare alla loro applicazione in ambito industriale, quindi all'automazione dei processi di produzione e manifatturieri, ma in realtà sono presenti in moltissimi altri campi e situazioni differenti. Per citare qualche esempio basti pensare alla robotica applicata all'intelligenza artificiale come veicoli autonomi, alla robotica medica quindi robot che svolgono procedure chirurgiche complesse con maggiore precisione, alla robotica per esplorazioni spaziali e sottomarine dove evidentemente si riconoscono i limiti dell'uomo oppure a robot utilizzati in ambito educativo e di ricerca.

1.1 ROBOT MOBILE OMNIDIREZIONALE

Un robot mobile omnidirezionale è un robot olonómico, ha quindi a disposizione tutti e tre i gradi di libertà nel piano in cui giace, ossia può muoversi in tutte le direzioni senza la necessità di ruotare su se stesso. Per raggiungere questa condizione di olonOMICITÀ il robot necessita di speciali ruote. In particolare, ne esistono di due diversi tipi:

- le omni wheels ovvero ruote con dei rulli i cui assi sono perpendicolari all'asse della ruota stessa.



Figura 1, Morfologia omni wheel

- le meccanum wheels ovvero ruote con rulli angolati per convenzione a 45° appositamente montati in modo da conferire alla ruota la classica geometria circolare.



Figura 2, Morfologia meccanum wheel

Per quanto riguarda il robot descritto in questa tesi sono state scelte delle meccanum wheels perché permettono una manovrabilità e una stabilità maggiore rispetto alle omni wheels, qualità che si rivelano fondamentali per gli scopi didattici e di ricerca previsti per questo progetto come, ad esempio, la possibilità di afferrare e spostare oggetti fino a 5kg attraverso un braccio robotico.

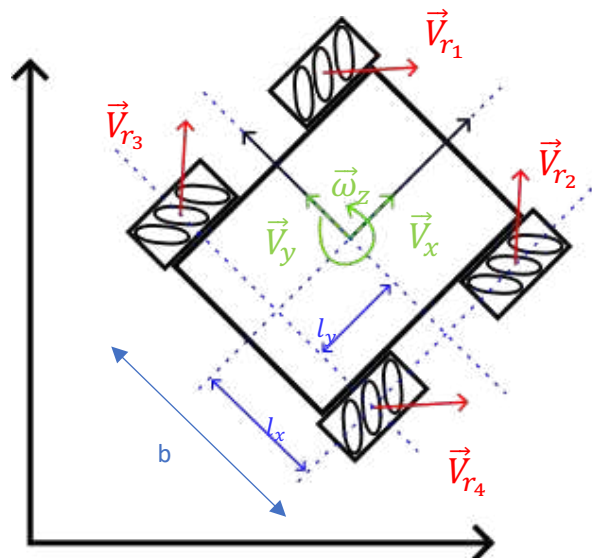


Figura 3, Modello semplificato del robot

1.2 SCOPO DELLA TESI

L'obiettivo di questa tesi è la progettazione meccanica di un robot mobile omnidirezionale partendo da specifiche ben precise. Sono state già effettuate, infatti, l'analisi cinematica, statica e dinamica del robot in un precedente studio nelle condizioni più sfavorevoli di utilizzo per determinare quale siano le dimensioni più critiche al fine di evitare il ribaltamento, per la scelta degli azionamenti e per la progettazione mecatronica di parte dei componenti elettronici funzionali lasciando poi ampio spazio per la scelta di componenti utili ai suoi fini didattici e di ricerca quali radar, lidar, sensori anticaduta e di movimento, ma anche dispositivi come telecamere o termocamere e molti altri.

In particolare, in questa tesi verranno affrontate la progettazione meccanica dello chassis, di vari supporti per l'alloggiamento dei cuscinetti e degli azionamenti, il dimensionamento del pacco batterie e degli alberi di trasmissione. Verrà poi presentata la distinta componenti classificando quale di questi dovranno essere acquistati e quali realizzati su misura perché non presenti sui comuni cataloghi dei fornitori.

CAPITOLO 2: SPECIFICHE DI PROGETTO

In questo capitolo verranno presentate le specifiche del robot, le prestazioni richieste e i componenti precedentemente selezionati.

2.1 SPECIFICHE GENERALI DEL ROBOT

Per quanto riguarda le specifiche generali del robot è stato richiesto che avesse una massa complessiva a pieno carico inferiore ai 70kg, una velocità nominale su superficie piana e orizzontale pari a 1 m/s raggiungibile con una accelerazione massima di 1 m/s^2 .

Per l'ingombro del robot invece, a seguito di un'accurata analisi statica e dinamica in condizione di incipiente ribaltamento a pieno carico è stato possibile determinare la dimensione più critica ovvero il valore minimo del lato b (vedi Figura 4) che è pari a 210 mm, mentre per il lato c (vedi Figura 4) non sono state fatte particolari richieste.

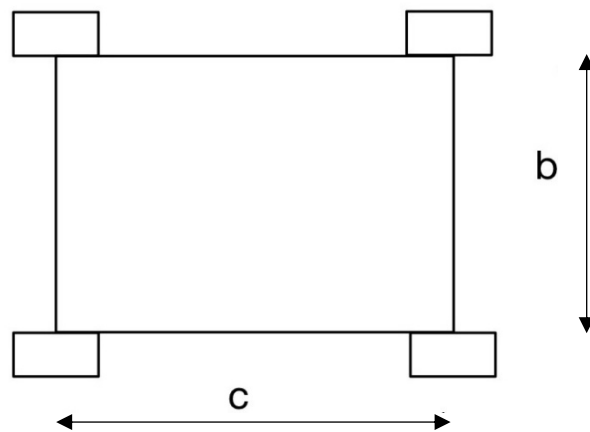


Figura 4, Dimensioni robot

2.2 AZIONAMENTI: MOTORE E RIDUTTORE

La scelta dell'azionamento è stata effettuata a seguito dell'analisi dinamica, in particolare, dopo il calcolo dei parametri fondamentali per la selezione dell'accoppiamento motore-riduttore, vale a dire la coppia nominale richiesta a ogni singola ruota e la velocità angolare unitaria:

$$C_u = 1,32 \text{ Nm}$$

$$\omega_{i \max} \approx 19 \text{ rad/s}$$

Il costruttore scelto è Maxon Motors, azienda che fornisce sistemi di alta precisione adatti a all'applicazione qui trattata.

Il motore selezionato è il DCX26 GB KL nella versione High Power che eroga una potenza di 40 W in modo tale da essere cautelati in caso di possibili sovraccarichi del dispositivo.

Valori con tensione nominale	
Tensione nominale	24 V
Velocità a vuoto	10700 min ⁻¹
Corrente a vuoto	65.7mA
Velocità nominale	9890 min ⁻¹
Coppia nominale (coppia max. continuativa)	57.8 mNm
Corrente nominale (corrente max. continuativa)	2.76 A
Coppia di stallo	695 mNm
Corrente di avviamento	32.4 A
Efficienza max.	90.7 %

Tabella 1, Dati tecnici motore Maxon Motors



Figura 5, Motore Maxon Motors

Il riduttore selezionato, invece, è il GPX26HP anch'esso nella configurazione High Power con un rapporto di riduzione di 35:1.

Dati riduttore	
Rapporto di riduzione	35:1
Rapporto di riduzione assoluto	4554/130
Numero di stadi	2
Coppia max. continuativa	3,00 Nm
Coppia consentita per breve tempo	4 Nm
Senso di rotazione, azionamento-uscita	=
Efficienza max.	75 %
Gioco riduttore medio senza carico	1 °
Momento di inerzia	3,922 gcm ²
Max. potenza trasferibile continuativa	60 W
Potenza max. trasmissibile intermittente	75 W

Tabella 2, Dati tecnici riduttore Maxon Motors



Figura 6, Riduttore Maxon Motors

2.3 SISTEMA MECCATRONICO

Per la rappresentazione visiva del sistema meccatronico e in particolare l'interazione e lo scambio dati tra i componenti elettronici e meccanici si faccia riferimento al seguente schema meccatronico:

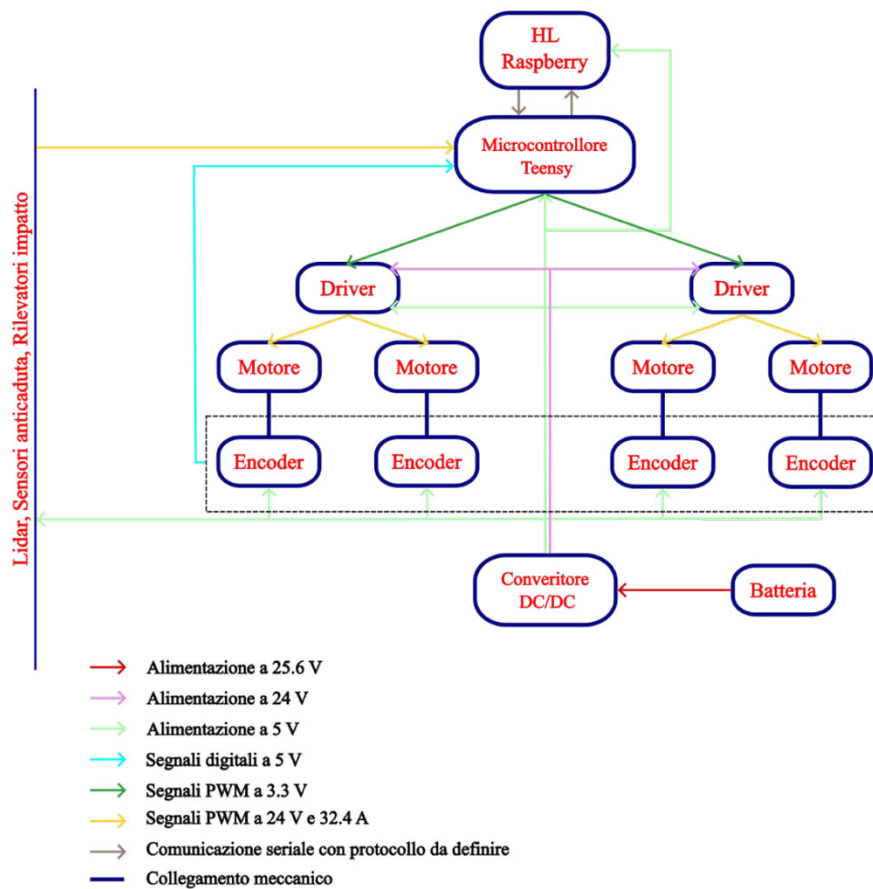


Figura 7, Schema mecatronico

2.3.1 MICROCONTROLLORE

Il microcontrollore selezionato non è un comune Arduino, bensì un Teensy 3.5 prodotto dalla PJRC che lavora ad una frequenza di 120 MHz perché più prestante. Grazie alla tecnologia Interrupt di tutti i suoi 64 pins, infatti, permette una trasmissione dati alleggerita e più veloce.

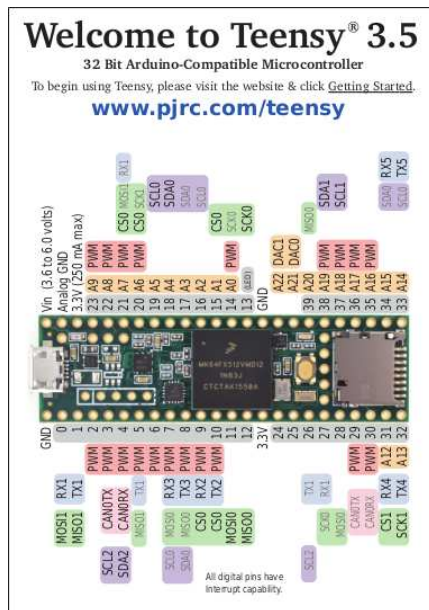


Figura 8, Microcontrollore Teensy 3.5

2.3.2 DRIVER

Il driver selezionato è il Pololu Dual G2 High Power da 24 V con corrente massima di output pari a 50 A; questo valore sarà determinante per il dimensionamento del pacco batterie. Il driver ha due inputs, uno di alimentazione e uno di comunicazione con il microcontrollore, e due outputs di comunicazione con i motori, pertanto sono previsti due drivers.

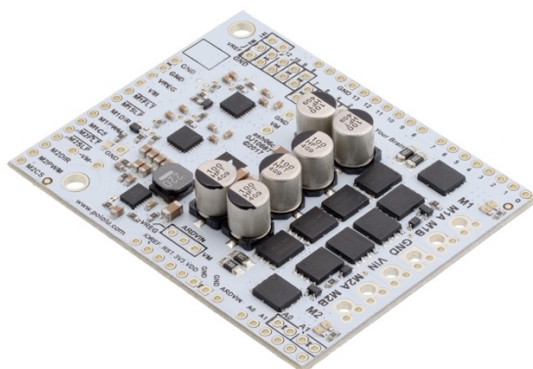


Figura 9, Driver Pololu Dual G2 HP

2.3.3 ENCODER

L'encoder ha il compito di misurare la velocità e l'accelerazione dell'albero motore. Il modello scelto è l'ENX10 da 12 impulsi fornito anch'esso dalla Maxon Motors.

Dati sensore	
Numero di impulsi per giro	12
Numero di canali	3
Line Driver	RS422
Velocità max. elettrica	90000 min ¹
Velocità max. meccanica	30000 min ¹

Tabella 3, Dati encoder Maxon Motors



Figura 10, Encoder Maxon Motors

2.3.4 CONVERTITORE DC/DC

Il convertitore DC/DC è un dispositivo in grado di abbassare a dovere la tensione in uscita partendo dall'alimentazione della batteria con una tensione nominale pari a $25.6 \pm 10\%$ V. In questo caso il convertitore come, si può notare dallo schema mecatronico in figura 7, deve garantire due uscite differenti, una a 3.3V e l'altra a 5V. Il modello scelto è il THM10 WI Series da 10 W della Traco Power ma va poi verificato a seconda del pacco batterie effettivamente scelto e dei componenti presenti che deve alimentare.



Figura 11, Convertitore DC/DC

2.3.5 BATTERIA

Il pacco batterie va dimensionato in base ai componenti da alimentare e tra quelli attualmente presenti la corrente di alimentazione dei drivers rappresenta il vincolo principale con i suoi 50 A ciascuno; quindi considerando trascurabili gli assorbimenti dovuti a microcontrollore ed encoders, il pacco batteria deve garantire un'uscita di 100 A. Ci sono diverse opzioni per la scelta della batteria:

- una batteria con tensione nominale di $25.6 \pm 10\%$ V e almeno una corrente da 100A.
- due batterie con tensione nominale di $25.6 \pm 10\%$ V e almeno 50A di corrente, una per ciascun driver.
- collegare in parallelo e/o in serie più batterie.

La scelta proposta per il pacco batteria ricade sulla terza opzione, in particolare si è scelta una batteria ricaricabile LiPo da 3,7 V e 18,5 A. Collegando 7 di queste batterie in serie la corrente rimane la stessa mentre la tensione si somma, raggiungendo così 25,9V, poi collegandone 6 in parallelo la tensione non varia mentre la corrente si somma, arrivando così a 111 A, per un totale di 42 batterie. Ovviamente si possono scegliere batterie con una con tensione e amperaggio differente a quelli proposti, in base anche alla loro reperibilità, seguendo lo stesso ragionamento. Rimane comunque da verificare la compatibilità di quest'ultima con la richiesta che effettivamente si avrà quando si saranno aggiunti tutti i componenti elettronici al robot.



Figura 12, Batterie LiPo da 3,7 V

2.4 UR5e

L'UR5e prodotto dalla Universal Robot è il braccio robotico pensato per questo progetto. Conta un peso di 20,6 kg ed è in grado di sollevare carichi fino a 5 kg, ciò lo rende la scelta ottimale in termini di prestazioni e ingombro in confronto alla sua versione meno e più performante rispettivamente l'UR3e e l'U10e. Tramite questo dispositivo sarà poi possibile effettuare prove meccaniche e simulazioni.

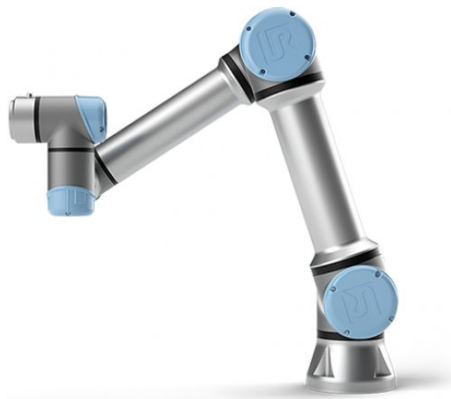


Figura 13, UR5e

CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE CHASSIS

In questo capitolo vengono presentate inizialmente le tre fasi di progetto con tre modelli di chassis sempre più complessi e funzionali, i primi due vengono introdotti brevemente indicando le problematiche riscontrate per poi passare al terzo modello con una descrizione più dettagliata analizzando i profili scelti e la geometria adottata.

Come prima fase è stato realizzato un modello semplificato in modo tale da capire l'effettivo ingombro dei componenti meccanici ed elettronici necessari al funzionamento del robot. Di fatto la struttura portante è composta da due basi collegate da due piastre, una nella quale sono stati montati i supporti per gli azionamenti e l'altra dove poi sarebbe stato montato il braccio robotico.

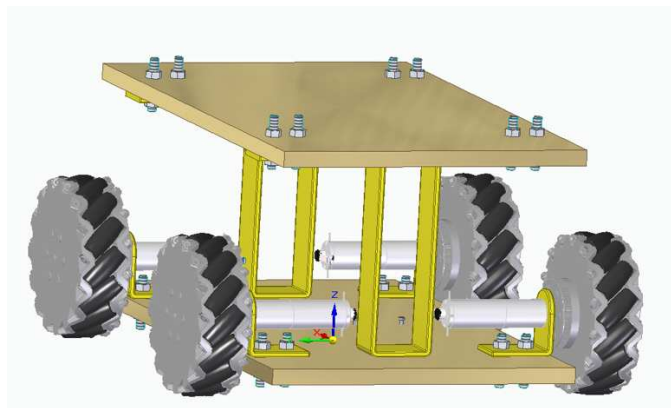


Figura 14, Primo modello chassis (I)

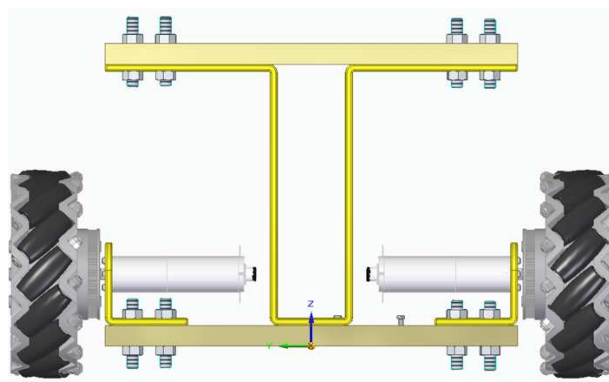


Figura 15, Primo modello chassis (II)

Già da una prima analisi visiva si può intuire che la piastra di collegamento ha una geometria non adeguata a causa degli elevati sforzi che andrà a subire in condizione di esercizio e quindi sarà soggetta a flessione; stesso fenomeno accade al supporto per l'alloggiamento degli azionamenti che viene sollecitato a flessione da tutto il carico del robot.

Con il secondo modello si cerca di risolvere le problematiche appena citate. In particolare, le due piastre di collegamento sono state sostituite con quattro piastre con geometria a C, mentre per quanto riguarda il supporto degli azionamenti è stato fatto in modo che tutto il carico del robot fosse sostenuto da una coppia di cuscinetti montati in appositi supporti.

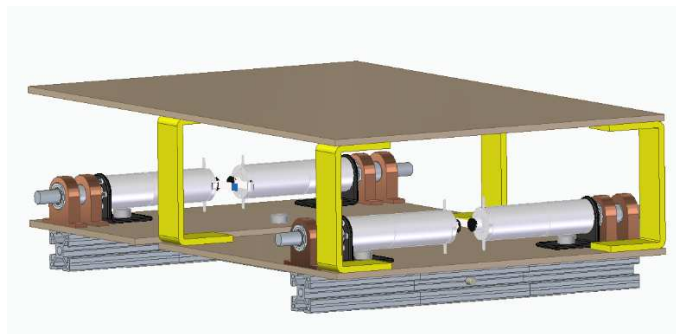


Figura 16, Secondo modello chassis (I)

In questo modello, la struttura portante non è composta da semplici basi metalliche, bensì da profili in alluminio Alutec che garantiscono maggiore robustezza al robot. Inoltre, a causa della rigidità dello chassis e la difficoltà di buon funzionamento delle meccanismi wheels in superfici non perfettamente piane, si è deciso di concedere un grado di libertà in più alla struttura separando il telaio in due sezioni opportunamente collegate da un albero sostenuto da una coppia di cuscinetti (vedi Figura 17).

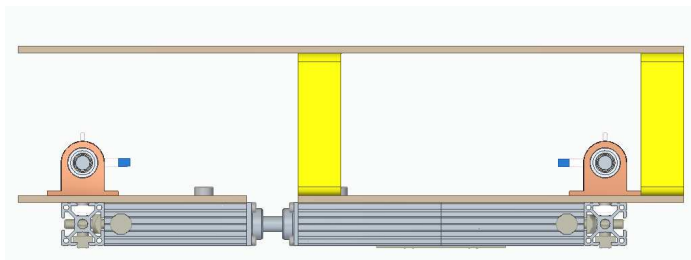


Figura 17, Secondo modello chassis (II)

Il modello finale è composto completamente da profili in alluminio Alutec in modo da limitare sia il numero di componenti da dover realizzare che il peso della struttura. Un altro problema che si è dovuto risolvere riguarda il collegamento tra le due sezioni di telaio perché i cuscinetti flangiati, come si vedono in Figura 17, non sono

disponibili della dimensione richiesta nei cataloghi dei comuni fornitori e allo stesso tempo progettarli e farli costruire sarebbe stato troppo costoso; in più, altro fattore critico riguarda la sollecitazione a flessione dell'albero. La soluzione adottata consiste nel montaggio di tre boccole a strisciamento opportunamente lubrificate inserite nel foro del profilo nel quale alloggia un albero filettato alle estremità fissato con un nottolino e un dado, vedi Figura 19; questa soluzione è adatta all'applicazione qui trattata visto il piccolo campo di rotazione previsto.

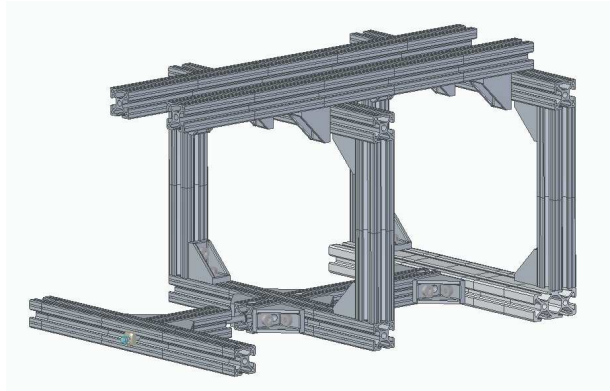


Figura 18, Terzo modello chassis

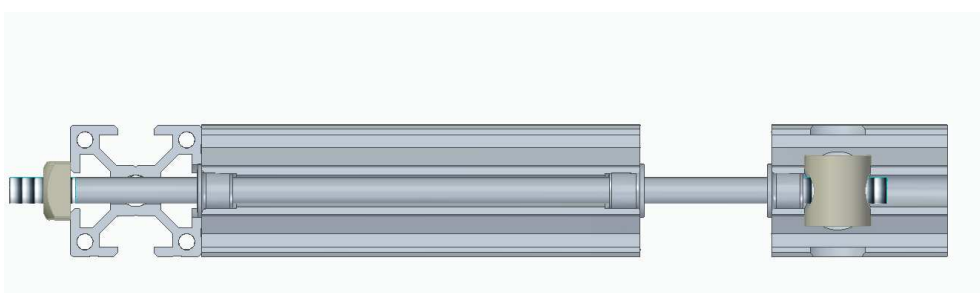


Figura 19, Sezione telaio

3.1 PROFILI SCELTI

Come accennato in precedenza i profili scelti per la realizzazione dello chassis sono dei profili in alluminio prodotti dall'azienda Alutec. Essendo molto resistenti e allo stesso tempo leggeri vengono utilizzati in moltissime applicazioni, come ad esempio nell'assemblaggio di nastri trasportatori, nelle celle di carico automatizzate o, come nel nostro caso, nei robot.

Sono stati selezionati due diversi profili:

- uno 30mm x 60mm, cava 8 (Figura 20)

- uno 30mm x 30mm, cava 8 (Figura 21)

La scelta di utilizzare due diverse dimensioni deriva dal fatto che nella parte anteriore del robot vanno montati sia i supporti per i cuscinetti e gli azionamenti che un altro profilo 30x30.

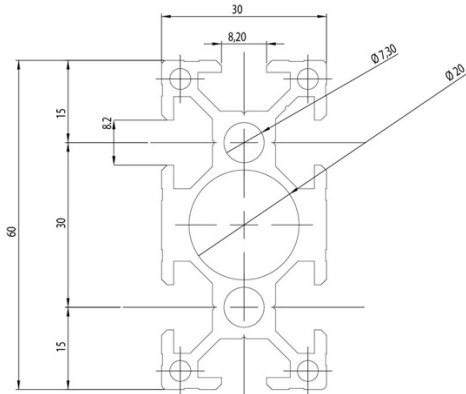


Figura 20, Profilo Alutec 103068

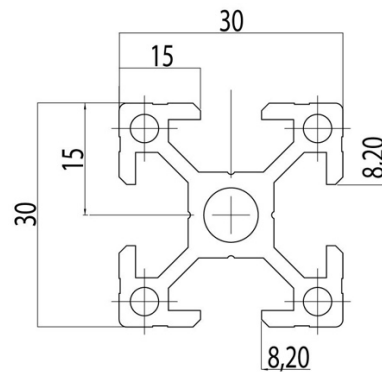


Figura 21, Profilo Alutec 103038

Osservando le caratteristiche generali dei profili, nella Tabella 4 e 5, risultano significativi i valori dei moduli di resistenza, ma soprattutto il peso, con solo 0,870 kg/m per il profilo 30x30 e 1.685 kg/m per quello da 30x60. Questo significa che nel complesso, trascurando il peso dei bulloni di montaggio e giunti di fissaggio, il telaio pesa meno di 5 kg.

Flessione momento di inerzia Ix	Flessione momento di inerzia Iy	Flessione modulo di resistenza wx	Flessione modulo di resistenza wy	Colore	Riferimento	Peso
2.900 cm ⁴	2.900 cm ⁴	1.930 cm ³	1.930 cm ³	Naturale	103038	0,870 Kg/m

Tabella 4, Caratteristiche generali profilo Alutec 103038

CARATTERISTICHE GENERALI

Legg: Al 6060
 Stato fisico: T6
 Tolleranze: DIN 17615
 Trattamento di superficie: Ossidazione anodica 15 µ m m
 (Su richiesta: alluminio grezzo / anodizzato nero / verniciato)
 Denominazione DIN :3.3206.72
 Densità: 2,7 kg / dm³
 Resistenza alla trazione: 220/250 N/mm²
 Allungamento: A5=10%/A10=8%
 Limite di snervamento: 180/200 N/mm² (0,2%)
 Modulo di elasticità: 70000 N/mm² c.a.
 Durezza Brinell: 75 HB c.a.
 Fornitura: barre di lunghezza mm 6010

Flessione momento di inerzia Ix	Flessione momento di inerzia Iy	Flessione modulo di resistenza wx	Flessione modulo di resistenza wy	Colore	Riferimento	Peso
20.350 cm ⁴	6.140 cm ⁴	6.780 cm ³	4.090 cm ³	Naturale	103068	1,685 Kg/m

Tabella 5, Caratteristiche generali profilo Alutec 103068

CARATTERISTICHE GENERALI

Legg: Al 6060
 Stato fisico: T6
 Tolleranze: DIN 17615
 Trattamento di superficie: Ossidazione anodica 15 µ m m
 (Su richiesta: alluminio grezzo / anodizzato nero / verniciato)
 Denominazione DIN :3.3206.72
 Densità: 2,7 kg / dm³
 Resistenza alla trazione: 220/250 N/mm²
 Allungamento: A5=10%/A10=8%
 Limite di snervamento: 180/200 N/mm² (0,2%)
 Modulo di elasticità: 70000 N/mm² c.a.
 Durezza Brinell: 75 HB c.a.
 Fornitura: barre di lunghezza mm 6010

3.2 GEOMETRIA

Per quanto riguarda la geometria del telaio era stata imposta dalle specifiche di progetto una dimensione minima di 210mm per il lato corto affinché il robot non si ribaltasse. Questa condizione non è stata di alcun problema perché per l'ingombro degli azionamenti e dei supporti è necessaria una barra profilata da 340mm. Nonostante questo, le dimensioni dello chassis sono comunque contenute, come si può notare nelle Figure 22 e 23, così da poter utilizzare il robot anche in ambienti relativamente ristretti.

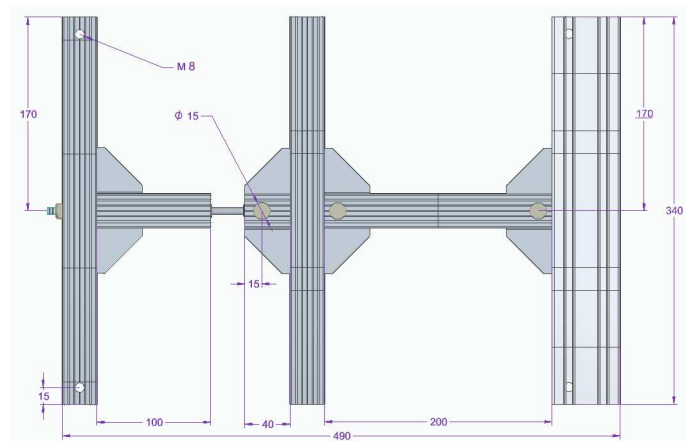


Figura 22, Dimensioni telaio (I)

La geometria ad H è giustificata dal fatto che, così, la parte superiore, dove viene montato l'UR5e, è vincolato completamente al telaio e non alla piastra dove alloggiavano i componenti elettronici.

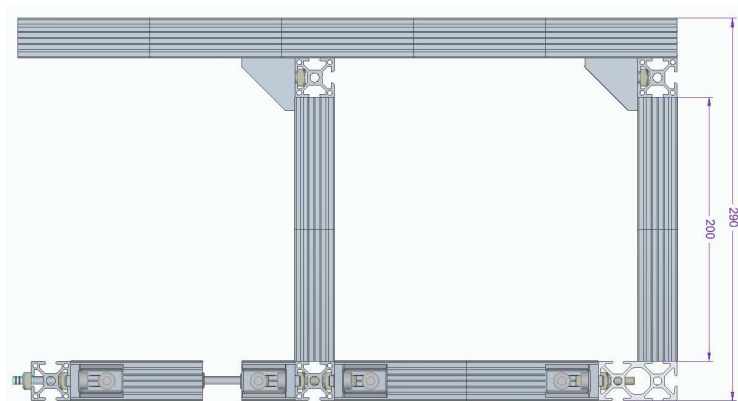


Figura 23, Dimensioni telaio (II)

Un'altra caratteristica importante della struttura è la facilità di scorrimento lungo i profili delle barre superiori. In questo modo il braccio robotico, essendo fissato con quattro bulloni M8x20, può essere montato in ogni zona all'interno del perimetro d'appoggio rendendo il robot più versatile e adatto a maggiori applicazioni.

3.3 COMPONENTI PER IL FISSAGGIO

I componenti utilizzati per assemblare il telaio e i supporti sono forniti anch'essi dall'azienda Alutec e garantiscono una tenuta sicura.

Nello specifico sono stati utilizzati:

- dei fissaggi angolari 25mm x40mm con dei bulloni M8x16
- dei fissaggi a nottolino semplice $\phi 16$
- dei bulloni M8x16 per i componenti
- dei bulloni M8x20 per l'UR5e

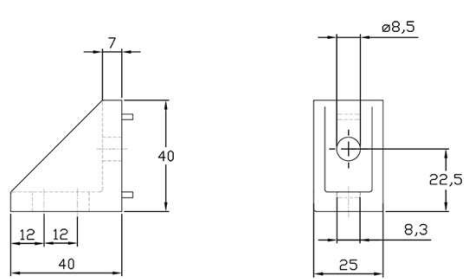


Figura 24, Fissaggio angolare

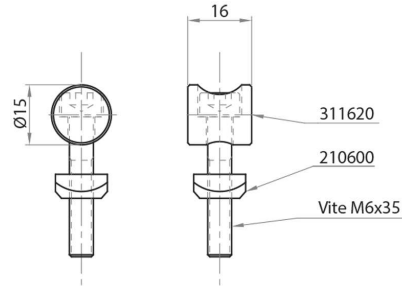


Figura 25, Fissaggio a nottolino semplice

Riferimento	Materiale	Tipo di angolare	Peso (Kg)
302540	alluminio pressofuso sabbato	25x40	0,040

Tabella 6, Dati angolare di fissaggio

Riferimento	Materiale	Stato di fornitura	Funzione	Peso (Kg)
311620	alluminio e acciaio	1 nottolino $\phi 16$, 1 vite M6x35 e 1 dado M6	per fissaggi privi di forature esterne, posizionamento scorrevoli e attacchi a croce	0,018

Tabella 7, Fissaggio a nottolino semplice

Riferimento	Materiale	Tipo di vite	M	L (mm)	D (mm)	K (mm)	S (mm)	Peso (Kg)
200816	Acciaio zincato	M8x16	8	16	13	5	5	0,009
200820	Acciaio zincato	M8x20	8	20	13	5	5	0,010

Tabella 8, Viti M8

Riferimento	Materiale	Funzione	Tipo di dado	Peso (Kg)
210800	Acciaio zincato	inseribile nelle scanalature anche dopo il montaggio	M8	0,004

Tabella 9, Dado M8

3.4 BASE PER IL SOSTEGNO DEI COMPONENTI ELETTRONICI

Vista la geometria dello chassis, la base in questione non è portante, pertanto, può essere realizzata in qualsiasi materiale. Le dimensioni della versione qui riportata sono di 280mm x 330mm per la base anteriore e di 280mm x 130mm per quella posteriore; ovviamente, le dimensioni possono essere variate, tenendo però conto che dovrà essere sagomata a dovere per il fissaggio dei componenti.

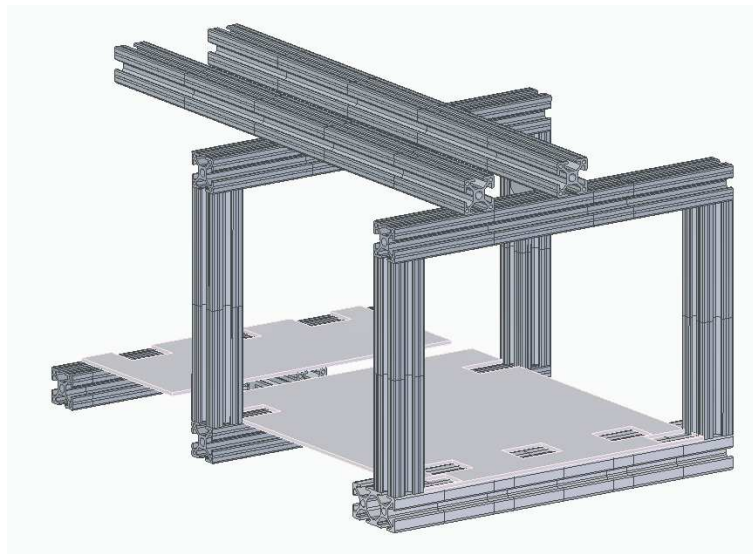


Figura 26, Base per il sostegno dei componenti elettronici

CAPITOLO 4: PROGETTAZIONE COMPONENTI MECCANICI

In questo capitolo vengono presentati in maniera più dettagliata i componenti meccanici necessari al funzionamento del robot.

4.1 SUPPORTO AZIONAMENTI

Come detto precedentemente questi supporti hanno il solo obiettivo di sostenere gli azionamenti, vale a dire motore, riduttore ed encoder tramite 6 viti di fissaggio M2.5x8. Non necessitano, quindi, di particolari attenzioni, se non il corretto posizionamento dei fori, che non sono stati filettati né per le sopraccitate viti né per l'M8x16 necessaria al fissaggio del supporto al telaio. Vista la geometria adottata e il piccolo spessore del supporto è stato previsto un rinforzo nella zona sottostante al foro per il riduttore per ridurre eventuali sforzi flessionali.

Viene qui riportata la tavola tecnica del supporto.

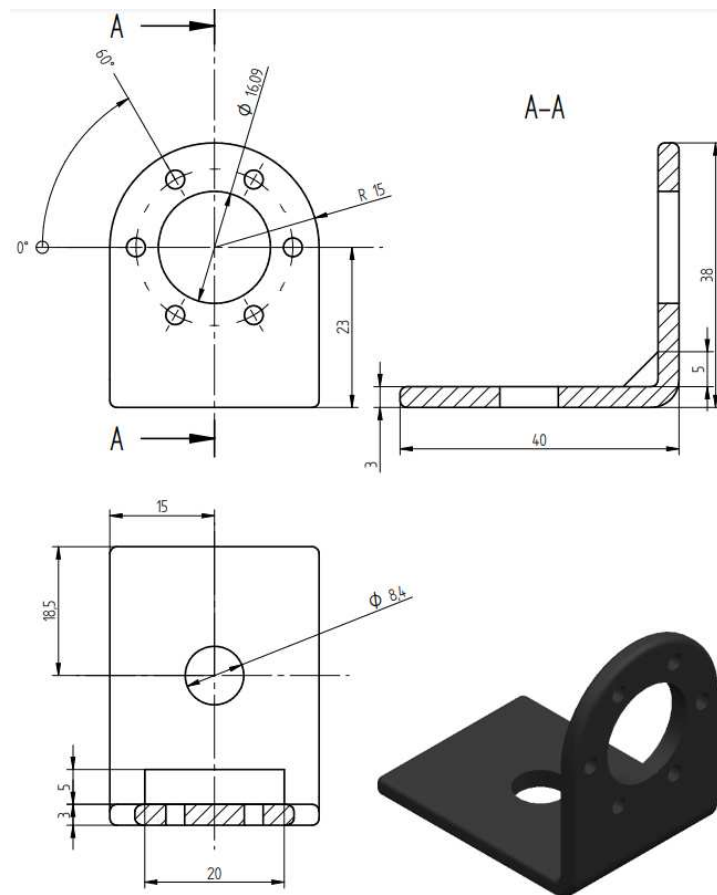


Tavola tecnica 1, Supporto azionamenti

4.2 SUPPORTO CUSCINETTI

Il supporto per i cuscinetti è uno dei componenti più importanti perché qui si scarica tutto il carico del robot.

Inizialmente sono stati realizzati due supporti, uno per ogni cuscinetto, con la geometria raffigurata nella Figura 27, tuttavia rende il supporto difficilmente montabile nel profilo in alluminio; pertanto, è stata adottata una geometria come quella che si vede nella Tavola tecnica 2. In questo modo il supporto ha la possibilità di essere fissato con un bullone M8x16, offerto dalla stessa azienda Alutec, pertanto il foro non è filettato. Anche in questo caso bisogna fare attenzione al posizionamento dei fori, sia quello di fissaggio del supporto al telaio che quelli di alloggiamento dei cuscinetti. Un piccolo disallineamento porterebbe a sollecitare l'albero del motore a flessione, il che sarebbe un grosso problema.

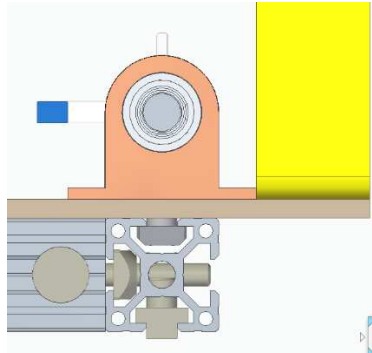


Figura 27, Supporto cuscinetto versione precedente

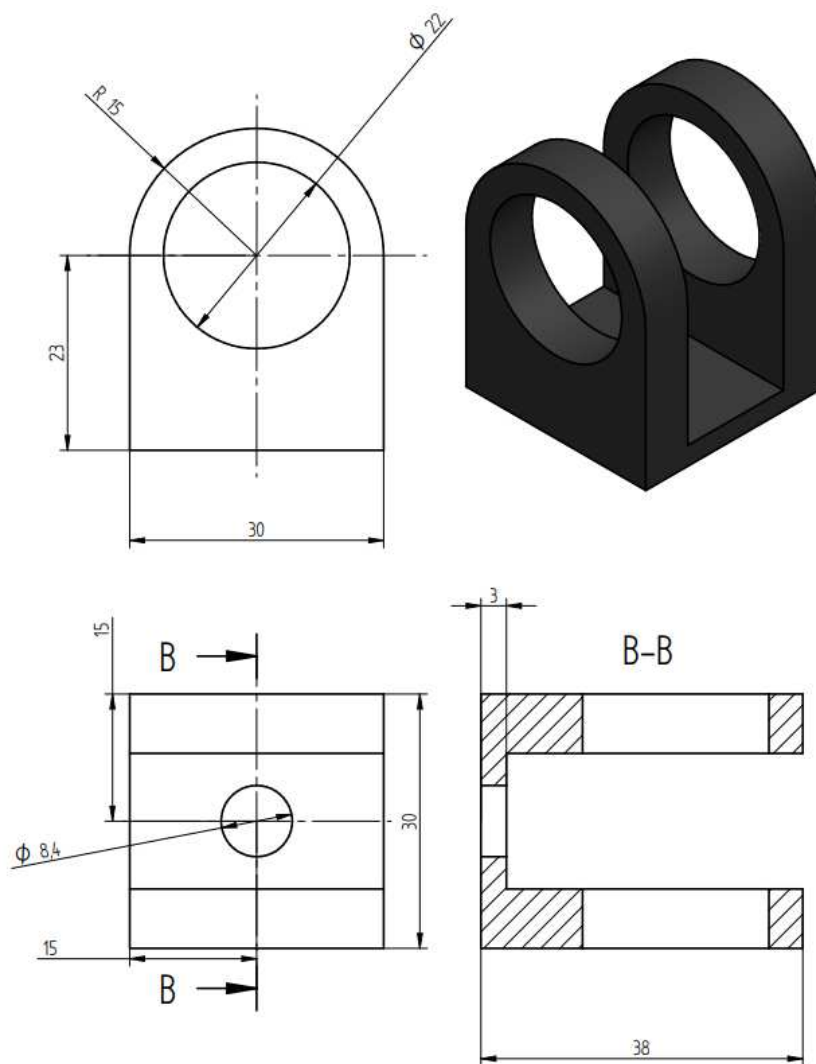


Tavola tecnica 2, Supporto Cuscinetti

4.3 ALBERO DI TRASMISSIONE AZIONAMENTI-RUOTE

L'albero di trasmissione della coppia è un semplice albero cilindrico in acciaio al fine di avere buona resistenza a torsione, con diametro di 8mm pari all'albero del riduttore ed è alloggiato nei due cuscinetti. Tra riduttore e albero si trova un giunto flessibile per attenuare un eventuale disallineamento, mentre tra la ruota e l'albero non è stato definito il tipo di collegamento perché questo dipende principalmente dal modello di ruota meccanum che verrà acquistata. Stesso ragionamento va fatto riguardo la lunghezza dell'albero.

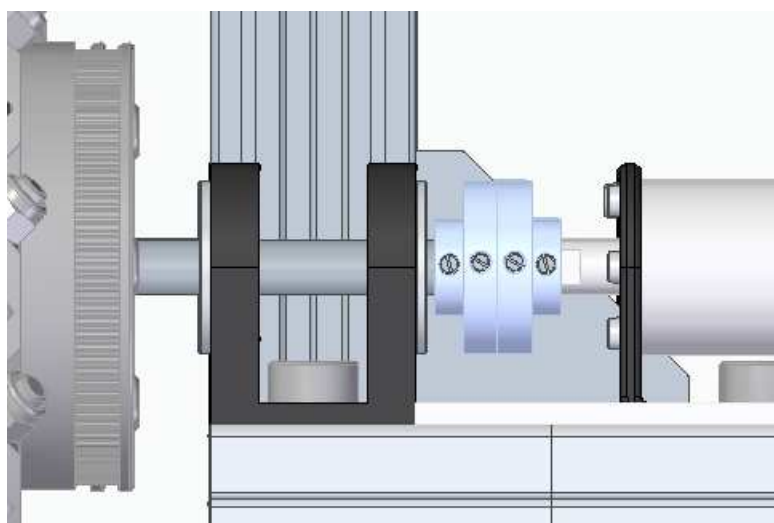


Figura 28, Montaggio albero di trasmissione

4.4 ALBERO DI COLLEGAMENTO CHASSIS

L'albero di collegamento tra le due sezioni dello chassis è un albero con diametro di 6mm pensato in acciaio, così da avere una resistenza a flessione sufficiente per l'applicazione. L'albero appoggia in tre boccole con $\phi_{esterno}$ 8 mm e $\phi_{interno}$ 6mm, montate nel profilo applicando un piccolo allargamento del foro centrale del profilo. Alle estremità è stata applicata una filettatura M6 così da poter essere fissato da una parte con un nottolino semplice ϕ 16 dell'Alutec e dall'altra da un semplice dado M6 (vedi Figura 19). Per quanto riguarda la lunghezza sono sufficienti 200mm al corretto assemblamento dell'albero.

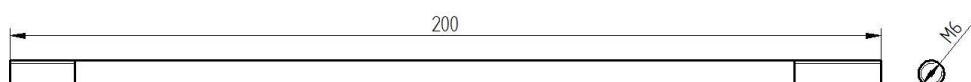


Tavola tecnica 3, Albero di collegamento chassis

4.5 DIMENSIONAMENTO CUSCINETTI

Quando si deve dimensionare un cuscinetto si devono considerare diversi aspetti, ossia le prestazioni richieste e le condizioni di esercizio. A seconda delle situazioni ci sono diversi fattori determinanti per la selezione del cuscinetto, come ad esempio può essere la sua vita utile, la temperatura d'esercizio oppure i livelli di vibrazione e rumorosità richiesti.

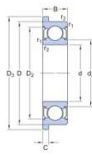
Considerando il massimo carico totale da supportare di 0.7kN, il diametro interno richiesto di $\phi 8\text{mm}$ e la velocità massima dell'albero all'uscita del riduttore di 200m/s , la SKF, azienda produttrice di cuscinetti che è stata selezionata, offre un'ampia gamma di prodotti compatibili all'applicazione.

In particolare, è stato selezionato il modello W208 R-2Z, cuscinetto radiale a sfere in acciaio inossidabile con anello esterno flangiato e tenuta integrata. I cuscinetti radiali a sfere in generale, sono particolarmente versatili, assicurano basso attrito ed essendo ottimizzati per ridurre i livelli di rumorosità e vibrazioni consentono velocità di rotazione elevate. Possono sopportare carichi assiali e radiali in ambo le direzioni, sono semplici da montare e richiedono meno attività di manutenzione rispetto ad altri tipi di cuscinetti. L'anello esterno flangiato consente di vincolare più facilmente i cuscinetti in direzione assiale all'interno dell'alloggiamento. Le tenute integrate possono prolungare considerevolmente la durata di esercizio dei cuscinetti, poiché realizzano la ritenzione del lubrificante e l'esclusione degli agenti contaminanti.



Figura 29, Cuscinetto W208 R-2Z

Sono qui riportate le dimensioni caratteristiche del cuscinetto fondamentali per il corretto montaggio del cuscinetto indicate dall'azienda costruttrice.



Dimensioni

d	8 mm	Diametro foro
D	22 mm	Diametro esterno
B	7 mm	Larghezza
d ₂	≈ 10.5 mm	Diametro dell'incavo
D ₂	≈ 19.03 mm	Diametro dell'incavo
D ₃	25 mm	Diametro flangia
C	1.5 mm	Larghezza della flangia
r _{1,2}	min. 0.3 mm	Dimensioni del raccordo

Tabella 10, Dimensioni W208 R-2Z

Per la verifica della compatibilità del cuscinetto all'applicazione qui trattata si è fatto riferimento ai dati di calcolo, in particolare ai coefficienti di carico dinamico e statico e alla velocità massima di esercizio tutti largamente inferiori ai valori limite del cuscinetto qui riportati.

Dati di calcolo

Coefficiente di carico dinamico	C	1.99 kN
Coefficiente di carico statico di base	C ₀	0.78 kN
Carico limite di fatica	P _d	0.034 kN
Velocità di riferimento		75 000 r/min
Velocità limite		38 000 r/min
Fattore di carico minimo	k _v	0.03
Fattore di calcolo	f ₀	7.2

Massa

Massa cuscinetto	0.013 kg
------------------	----------

Classe di tolleranza

Tolleranze dimensionali	Normal
Runout radiale	Normal

Tabella 11, Dati di calcolo W208 R-2Z

4.6 GIUNTO FLESSIBILE

Se fosse stato disponibile da catalogo un riduttore GPX26HP in configurazione femmina, la trasmissione di coppia dal riduttore all'albero sarebbe avvenuta con una semplice chiavetta, ma così non è stato. Le soluzioni possibili sono diverse, ma la scelta è ricaduta sull'utilizzo di un giunto; ne esistono di vari tipi, ma quelli adatti a questa applicazione sono solamente due: quelli rigidi e quelli flessibili. Tuttavia, i giunti rigidi (come quello che si vede in Figura 28) non sono ottimali poiché un

piccolo disallineamento degli assi causerebbe una sollecitazione a flessione dell'albero del riduttore e di conseguenza, in regime di rotazione, fatica ciclica, diminuendo drasticamente la sua vita utile. Quindi, non rimane altro che l'opzione del giunto flessibile; sono qui presentati due modelli di giunti da verificare in termini di ingombro e fattibilità:

- accoppiatore Ruland, con accoppiamento a fascio.



Figura 30, Accoppiatore Ruland a fascio

- due accoppiatori Ruland, con accoppiamento di tipo Oldham e un accoppiatore flessibile per giunti.



Figura 31, Accoppiatore Ruland Oldham



Figura 32, Accoppiatore flessibile

CAPITOLO 5: CONCLUSIONE

5.1 CARATTERISTICHE RICHIESTE

Lo scopo della tesi era la progettazione meccanica di un robot mobile omnidirezionale nel quale doveva essere montato un braccio robotico UR5e per fini didattici e di ricerca presso l'Università Politecnica delle Marche. Il progetto è partito da solidi basi, infatti, era stata già effettuata una progettazione funzionale del robot a seguito di un'analisi cinematica, statica e dinamica e parte della progettazione meccatronica di componenti funzionali. I vincoli progettuali si limitavano ad una dimensione minima di 210mm per il lato corto dello chassis, affinché il robot non si ribaltasse in condizione di pieno carico, che il suo peso massimo fosse inferiore ai 70 kg e che si utilizzassero, ovviamente, i componenti selezionati durante la progettazione funzionale.

5.2 PROBLEMI RISCONTRATI, RISULTATI OTTENUTI E DISCUSSIONE

I vincoli imposti dal progetto non sono stati molto limitanti dal punto di vista progettuale, di fatto, tutte le specifiche sono state ampiamente rispettate. Il lato corto dello chassis è stato realizzato di 340mm per ovviare all'ingombro dei due azionamenti che dovevano essere coassiali, mentre per contenere il peso complessivo del robot e allo stesso tempo garantire un'ottima resistenza a flessione e a torsione è stato realizzato un telaio completamente in alluminio selezionando l'azienda Alutec come fornitore. I problemi riscontrati durante la progettazione sono stati principalmente nel realizzare il sistema di sostegno del carico del robot senza che si andasse a danneggiare la componentistica adiacente e il sistema di collegamento tra le due sezioni del telaio, essendo una zona critica in termini di sollecitazioni a flessione. A seguito di diverse prove, le problematiche sono state superate con successo, andando da una parte a progettare due componenti distinti, ovvero un supporto per il sostegno del carico con due cuscinetti e un supporto per l'alloggiamento degli azionamenti (paragrafo 4.1 e 4.2) e dall'altra a realizzare un albero sostenuto da tre boccole (paragrafo 4.4). Vengono qui presentate alcune immagini del robot assemblato completamente.

Figura 33,
Robot (I)

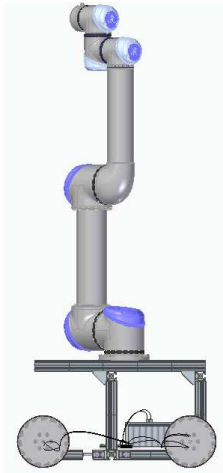


Figura 34,
Robot (II)

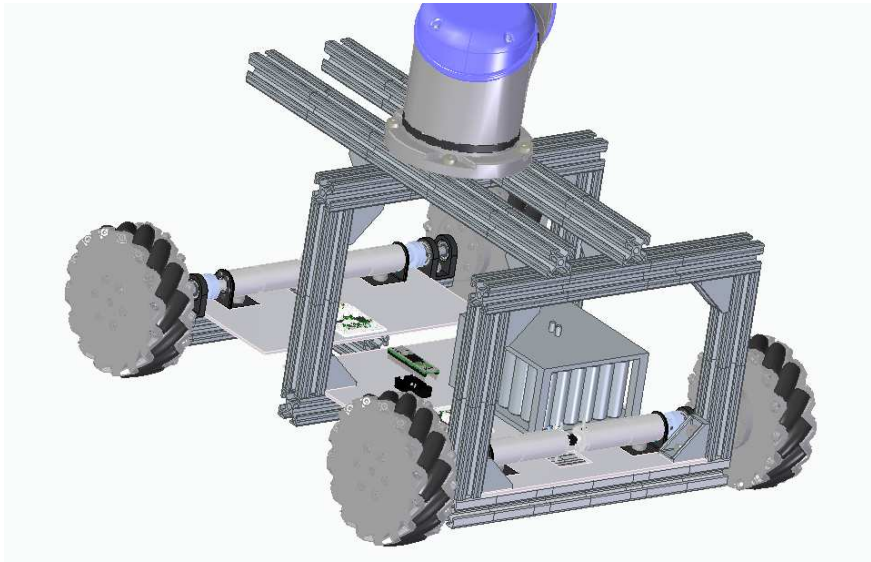


Figura 35, Robot (III)

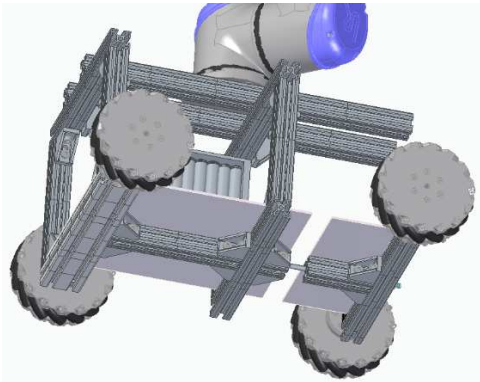


Figura 36, Robot (IV)

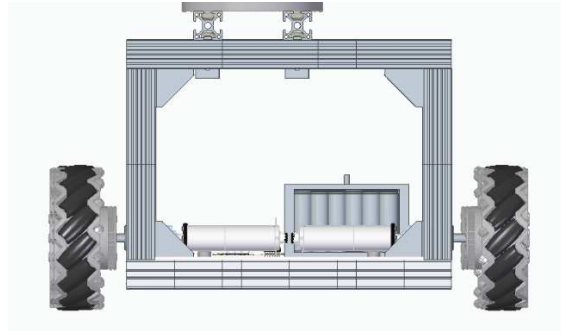


Figura 37, Robot (V)

5.3 OPERAZIONI SUCCESSIVE

In seguito a questa progettazione meccanica non basta un semplice assemblamento dei componenti qui descritti per considerare il prototipo terminato; infatti, va eseguita una progettazione mecatronica dettagliata con tanto di mappamento dei cablaggi per la corretta interazione e trasmissione dati tra i componenti. Il robot, inoltre, potrebbe essere migliorato in futuro in termini di prestazioni a seconda dell'utilizzo che l'università ne vuole fare; come accennato inizialmente, vista la disponibilità di spazio, potrebbero essere installati diversi dispositivi quali radar, lidar, sensori anticaduta e di movimento, telecamere o termocamere, ma si potrebbe anche pensare di installare software basati su intelligenza artificiale per l'apprendimento automatico, così da poter eseguire compiti in modo autonomo o semi autonomo.

APPENDICE: DISTINTA COMPONENTI

In questa sezione viene presentata la distinta componenti completa di azienda costruttrice, fornitore e codice per l'acquisto.

COMPONENTI MECCANICI

Componente	Costruttore	Fornitore	Codice acquisto	quantità
Motore DCX26LGB KL	Maxon Motors	Maxon Motors	DCX26L01GBKL529	4
Riduttore GPX26HP	Maxon Motors	Maxon Motors	406767	4
Encoder ENX10	Maxon Motors	Maxon Motors	714457	4
UR5e	Universal Robot	Universal Robot		1
Cuscinetto SKF	SKF	SKF	W608 R-2Z	8
Boccola 8x6x8	Igus	RS	271-4548	3
Albero trasmissione azionamenti- ruote $\phi 8$ (*)				4
Albero collegamento chassis $\phi 6$ (*)				1
Supporto cuscinetti (*)				4
Supporto azionamenti(*)				4
Base anteriore (*)				1
Base posteriore (*)				1
Profilo 30x30 cava standard 8 200mm	Alutec	Alutec	103038	5

Profilo 30x30 cava standard 8 340mm	Alutec	Alutec	103038	4
Profilo 30x30 cava standard 8 100mm	Alutec	Alutec	103038	1
Profilo 30x30 cava standard 8 40mm	Alutec	Alutec	103038	1
Profilo 30x30 cava standard 8 500mm	Alutec	Alutec	103038	2
Profilo 30x60 cava 8 340mm	Alutec	Alutec	103068	1
Meccanum wheel ϕ 150mm				4

(*) Componenti da realizzare.

ELEMENTI DI FISSAGGIO

Componente	Costruttore	Fornitore	Codice	Quantità
Vite M8x16	Alutec	Alutec	200816	48
Vite M8x20	Alutec	Alutec	200820	4
Dado M8	Alutec	Alutec	210800	52
Dado M6	Alutec	Alutec	210600	1
Angolare di fissaggio	Alutec	Alutec	302540	20
Fissaggio a nottolino semplice ϕ 16	Alutec	Alutec	311620	3
M2.5x8				24
Accoppiatore a fascio (**)	Ruland	RS	364-3149	4
Accoppiatore Oldham(**)	Ruland	RS	745-8068	8
Accoppiatore flessibile per giunto (**)	Ruland	RS	745-8150	4

(**) Possibili giunti flessibili da verificare.

COMPONENTI ELETTRONICI

Componente	Costruttore	Fornitore	Codice	Quantità
Driver G2 HP	Pololu	Pololu	2518	2
Microcontrollore Teensy 3.5	PJRC	PJRC	TEENSY35	1
Convertitore DC/DC (***)	Traco Power	Traco Power	THM10 WI	1
Batteria 3,7V 18,5° (***)				42

(***) Componenti da verificare in base all'effettiva richiesta di corrente.