Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Integrazione di un robot mobile con un manipolatore collaborativo

Integration of an autonomous mobile robot with a collaborative manipulator

Tesi di Laurea di:
Matteo Forlini

Relatore:
Prof. Ing. Giacomo Palmieri

A.A. - 2020/2021

Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Integrazione di un robot mobile con un manipolatore collaborativo

Integration of an autonomous mobile robot with a collaborative manipulator

Tesi di Laurea di:
Matteo Forlini

Relatore:
Prof. Ing. Giacomo Palmieri

A.A. - 2020/2021

Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria

Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Ringraziamenti

Un ringraziamento doveroso va all'azienda Joytek, a David Baldarelli e a tutto il personale, ma anche al gruppo di Meccanica delle macchine dell'Università Politecnica delle Marche che hanno reso possibile questo lavoro di tesi e mi hanno supportato in ogni fase

Un ringraziamento va alla mia famiglia che mi ha permesso di effettuare questo percorso e che mi ha sempre supportato e sopportato in ogni momento.

Un grazie speciale ai miei amici e ai miei compagni di corso che mi hanno fatto vivere questi due bellissimi anni con spensieratezza e entusiasmo e mi sono sempre stati accanto.

Un grazie ai miei parenti e alle persone mie care che hanno sempre creduto in me.

Infine per ultimo, ma non per ultima, vorrei condividere questo traguardo con colei che in questi due anni non mi ha mai fatto sentir solo e mi ha sempre appoggiato in ogni mio passo. A te Letizia, che hai reso questo percorso meno faticoso e più avvincente, un grazie particolare.

,

Matteo Forlini

Indice

Introduzione **1**

1 Industria 4.0: cosa è **3**
1.1 Industria 4.0: l'inizio di una nuova era . . . 3
1.2 I principi cardini della rivoluzione . . . 3
1.3 La quarta rivoluzione e i suoi effetti sul futuro . . . 4
1.4 Piano Industria 4.0 italiano . . . 6

2 Robotica collaborativa **7**
2.1 I vantaggi dei cobot . . . 7
2.1.1 Differenze tra cobot e vecchi robot . . . 9
2.1.2 Le 4 tipologie di operazioni collaborative . . . 10
2.2 Andamento del mercato mondiale della robotica . . . 11
2.3 Principali produttori di Cobot . . . 14
2.4 Robot mobili . . . 15
2.4.1 Principali fornitori di AMR presenti oggi sul mercato . . . 18

3 Integrazione tra un AMR e un manipolatore cobotico **20**
3.1 Principali soluzioni presenti sul mercato ad oggi . . . 21
3.1.1 KUKA . . . 21
3.1.2 Mir in partnership con UR . . . 22
3.1.3 Omron . . . 23
3.2 La soluzione da progettare in Joytek . . . 24

4 Specifiche da osservare per l'integrazione di LD90 con TM **27**
4.1 Safety . . . 27
4.2 Alimentazione . . . 29
4.2.1 Durata della batteria . . . 30
4.3 Meccanica . . . 31

5 Serie AMR Omron: LD90 **33**
5.1 AMR Omron . . . 33
5.2 Caratteristiche LD90 . . . 35

6 Cobot TM5 e TM12 Omron: caratteristiche **41**
6.1 Cobot Omron . . . 41

6.2 Specifiche TM5 e TM12 42
6.2.1 TM5-900 43
6.2.2 TM12 45
6.3 Risoluzione cinematica diretta TM5 e TM12 47

7 Riferimenti teorici sulla cinematica di un robot antropomorfo 48
7.1 Trasformazioni di coordinate 48
7.1.1 Traslazione rigida 50
7.1.2 Rotazione rigida 51
7.1.3 Rototraslazione 52
7.2 Analisi cinematica di posizione 54
7.2.1 Esistenza delle soluzioni 58
7.2.2 Soluzioni multiple 58
7.2.3 Singolarità 59
7.3 Notazione di Denavit-Hartember 60

8 Risoluzione cinematica diretta del TM5 e del TM12 e calcolo delle posizione del baricentro del sistema 63
8.1 Analisi statica TM5-900 64
8.2 Analisi statica TM12 71

9 Analisi dinamica del braccio robotico sopra all'AMR: caso TM5 e TM12 75
9.1 Analisi dinamica TM12 braccio in verticale 76
9.2 Analisi dinamica TM12 braccio in orizzontale 81
9.3 Analisi dinamica TM5 in posizione verticale e orizzontale 82

10 Studio dei risultati ottenuti nell'analisi dinamica 85
10.1 Studio di un eventuale ribaltamento 85
10.2 Studio di un eventuale strisciamento 90

11 Progettazione del sistema per Joytek 91
11.1 Cinematismo di apertura e chiusura degli appoggi a terra 92
11.1.1 Cinematica diretta 95
11.1.2 Statica cinematismo 96
11.1.3 Scelta dell'attuatore rotativo 98
11.1.4 Incernieramento delle aste 101
11.1.5 Sistema di blocco manovellismo 104
11.1.6 Forchette per incernierare asta sulla piastra 107
11.1.7 Piedino in gomma di appoggio "ELESA" 108
11.1.8 Geometrie del piedino 109
11.1.9 Collegamento albero-mozzo del motore 110
11.2 Piastra definitiva e soluzione assemblata con i 4 cinematismi 111

12 Analisi baricentro del carico trasportato dall'AMR **114**

13 Progettazione colonna di sollevamento robot **118**
13.1 Scelta manicotti 119
13.2 Snodi sferici 125
13.3 Profili di alluminio e piastra di fissaggio TM12 125
13.4 Attuatore lineare a vite trapezia 127
13.5 Analisi dei pesi 128

14 Soluzione finale **130**

15 Conclusioni e possibili sviluppi futuri **135**

Bibliografia **138**

Elenco delle figure

1.1 Time-line delle rivoluzioni industriali 5

2.1 Esempi di possibili applicazioni 9
2.2 Confronto tra cobot e robot 10
2.3 Numero di installazioni annuali nel mondo di robot industriali (fonte IFR) 12
2.4 Numero totali di robot installati (fonte IFR) 12
2.5 Installazione per paese nel 2019 (fonte IFR) 13
2.6 Installazione medie per paese nel 2019 (fonte IFR) 13
2.7 Numero di cobot negli anni (fonte IFR) 14
2.8 Un AMR in funzione 15
2.9 Differenza principale tra un AGV e un AMR 16
2.10 numero di robot mobili negli anni futuri divisi per settore (fonte IFR) 18
2.11 Fornitori di AMR/AGV (fonte Interact Analysis) 19

3.1 Un Mir integrato con un UR 20
3.2 KUKA iiwa 22
3.3 Un Mir integrato con un UR 23
3.4 Integrazione di un AMR della famiglia "LD" con un cobot "TM" Omron 24
3.5 Posizioni in cui l'AMR può muoversi e non muoversi 25

4.1 Interruttore di sicurezza in cui l'AMR può muoversi e non muoversi 29

5.1 Serie di AMR Omron. Da destra a sinistra: HD1500, LD250, LD90 34
5.2 Ingombri di massima LD90 35
5.3 Velocità e accelerazioni imprimibili 36
5.4 Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 60 Kg 36
5.5 Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 90 Kg 37
5.6 Baricentro dello LD90 senza carico 38
5.7 Battery output 38
5.8 LD90 con illustrato tutti i suoi componenti 39

6.1 I 6 gradi di libertà di cui dispone un corpo rigido 42
6.2 Dimensioni TM5-900 44
6.3 Grafico distanza flangia/baricentro in funzione dei Kg 45
6.4 Dimensioni TM12 46

6.5 Grafico distanza flangia/baricentro in funzione dei Kg per TM12 47

7.1 Sistema di rototraslazione di un robot seriale 49
7.2 Le diverse terne che possono essere definite in uno spazio di lavoro 50
7.3 Traslazione di coordinate 51
7.4 Rotazione rigida di sistemi di riferimento 51
7.5 Rotazione rigida e traslazione di sistemi di riferimento 53
7.6 La catena cinematica di un robot seriale 55
7.7 4 diverse posture per un robot PUMA corrispondenti alla stessa posa nello spazio di lavoro 59

8.1 Posizionamento terne di Denavit Hartemberg sul TM5 64
8.2 Posizionamento dei baricentri dei vari membri TM5-900 67
8.3 Posizione dei vari baricentri del sistema complessivo 70
8.4 Posizionamento dei baricentri dei vari membri TM12 72
8.5 Posizione dei vari baricentri del sistema complessivo con il TM12 74

9.1 Matrici di inerzia di ogni singolo link o joint TM12 ($Kgmm^2$ (le lettere sono quelle riportate nella figura8.4) 77
9.2 Passaggio dal sistema di riferimento iniziale a destra a quello finale a sinistra . . . 78
9.3 Matrici di inerzia di ogni singolo link o joint TM5 ($Kgmm^2$) (le lettere sono quelle riportate nella figura**??**) 83

10.1 Pianta in cui si mostra la circonferenza dove si va a posizionare il nuovo baricentro 89

11.1 Sketch del meccanismo ideato 93
11.2 Sketch del meccanismo adottato nella progettazione 94
11.3 Meccanismo dimensionato in SolidEdge con le relative dimensioni 95
11.4 Reazioni vincolari incognite da trovare 97
11.5 Esempio di motoriduttore a vite senza fine con motore brushless INTECNO 100
11.6 Motoriduttore INTECNO CM-26-60-U-BL012.240 101
11.7 Viti ISO 7379 102
11.8 Tolleranze boccole 103
11.9 Meccanismo di blocco della rotazione con in evidenza il disallineamento tra manovella e biella 105
11.103 viste del sistema di blocco 106
11.11Dimensione dell'asola 107
11.12Forchetta per incernierare asta con relative dimensioni 108
11.13Piedino di livellamento 109
11.14Dimensione del piede di appoggio a terra 109
11.15Collegamento albero mozzo 110
11.16Vista isometrica dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi 111

11.17Vista dall'alto dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi 112
11.18Vista frontale dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi 112
11.19Spessori della piastra (in evidenza lo scavo interno di alleggerimento di 5 mm) . . . 113

12.1 Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 90 Kg 115

13.1 2 viste della colonna di sollevamento progettata 119
13.2 Valori di f_B 121
13.3 Valori di a_S 121
13.4 Valori di f_W 123
13.5 Valori di a_1 124
13.6 Snodo sferico 125
13.7 Profilo di alluminio 126
13.8 DINGS NEMA24 non-captive 127
13.9 Grafico spinta/velocità NEMA24 128

14.1 4 viste dell'intero sistema progettato 131
14.2 Vista complessiva del sistema mentre il TM12 è in funzione 132

Elenco delle tabelle

6.1 Valori di range movimento e velocità per ogni giunto TM5-900 43
6.2 Valori di range movimento e velocità per ogni giunto TM12 46

8.1 Valori dei 4 parametri di Denavit Hartemberg TM5 65
8.2 Posizione relativa dei baricentri TM5-900 68
8.3 Valori dei 4 parametri di Denavit Hartemberg TM5 73
8.4 Posizione relativa dei baricentri TM5-900 73

9.1 Valori di coppia per ogni giunto TM12 76
9.2 Valori di coppia per ogni giunto TM5-900 76

Introduzione

L'obiettivo del lavoro svolto è quello di progettare un Moma:mobile manipulator. Nello specifico il sistema consiste in un braccio robotico che è in grado di spostarsi all'interno del plant dell'azienda e andare a lavorare in diversi condizioni e in diversi ambienti poiché non è installato su una postazione fissa ma su una piattaforma mobile. La possibilità di spostamento del robot viene garantita in maniera autonoma e automatica da un AMR, di fatto vi è un integrazione dei due sistemi. L'AMR consente lo spostamento e una volta giunto a destinazione il robot montato sopra di esso potrà lavorare con qualsiasi operazione e task che gli si voglia far fare.

Tale progetto è stato ideato ed elaborato presso l'azienda Joytek S.r.l con sede in Monsano via Molise 11 che si occupa di progettazione e realizzazione sistemi di automazione industriale.

Il lavoro è stato svolto in tale sede con l'ausilio delle competenze tecniche messe a disposizione dell'azienda. Uno studio teorico preliminare è stato anche svolto in ambito universitario.

Fulcro del lavoro è l'automazione industriale a 360° e nello specifico l'Industry 4.0 e il mondo dei cobot.
Viene fatta una breve trattazione sullo stato dell'arte della robotica collaborativa e come essa sta cambiando il mondo produttivo per rendere chiaro al lettore di cosa si sta parlando e l'importanza che tale progetto assume nel contesto odierno. Si introduce questa nuova frontiera che è rappresentata dalla manipolazione mobile e i suoi possibili vantaggi e svantaggi, di come essi possono essere usati nel contesto aziendale e le già possibili configurazioni di Mobile Manipulator presenti sul mercato.

Successivamente viene descritto in dettaglio quali robot sono stati scelti di usare in tale progetto, le loro caratteristiche e il perché della loro scelta. Vengono riportate le loro specifiche tecniche per i due robot presi in considerazione, quindi AMR e braccio robotico. A partire dalle loro caratteristiche sono definiti i parametri fondamentali da tenere in considerazione e rispettare per la progettazione del sistema.

Entrando nello specifico, viene affrontata la cinematica diretta del cobot, tramite il software MatLab, calcolando la posizione esatta del baricentro complessivo al variare di tutte le possibili configurazioni di giunto. Tale studio preliminare è fondamentale per studiare la stabilità del sistema e di conseguenza prendere le dovute precauzioni e soluzioni per garantirla. Viene fatta anche un'analisi dinamica delle forze e momenti che si scaricano sull'AMR durante il movimento del cobot, sempre per vedere se tali forze possono causare il ribaltamento di tutto il sistema.

Si spiegano e illustrano le possibili soluzioni pensate per garantire la stabilità e quella che poi alla fine viene scelta per la realizzazione.

Elenco delle tabelle

Viene studiato un sistema per far si che il cobot possa anche sollevarsi e quindi variare la proprio altezza della base di riferimento, rendendo così il sistema più versatile e capace di lavorare anche a diverse altezze. Si descrive la soluzione migliore ideata e progettata entrando in tutte le specifiche di progetto.

In conclusione si propone il sistema nel suo complessivo descrivendo i limiti e potenzialità. Viene dettata una linea per i possibili sviluppi e miglioramenti che senz'altro si potranno attuare e portare avanti in futuro dall'azienda.

Capitolo 1

Industria 4.0: cosa è

1.1 Industria 4.0: l'inizio di una nuova era

Il termine Industria 4.0 indica una tendenza dell'automazione industriale che integra alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro, creare nuovi modelli di business e aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti. Industria 4.0, prende il nome dall'incipit europeo Industry 4.0, a sua volta ispirata ad un progetto del governo tedesco. Nello specifico la paternità del parola tedesca Industrie 4.0 viene assegnata a Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster che lo impiegarono per la prima volta in una comunicazione, tenuta alla Fiera di Hannover del 2011, in cui preannunciarono lo Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Concretizzato alla fine del 2013, il progetto per l'industria del futuro Industrie 4.0 prevedeva investimenti su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende per ammodernare il sistema produttivo tedesco e riportare la manifattura tedesca ai vertici globali rendendola competitiva a livello mondiale [1] [2].

1.2 I principi cardini della rivoluzione

L'industria 4.0 passa per il concetto di smart factory, che si compone di tre parti [1]:

- **Smart production**: nuove tecnologie produttive che originano collaborazione tra tutti gli elementi presenti nella produzione ovvero interazione collaborativa tra operatore, macchine e strumenti.
- **Smart service**: tutte le "infrastrutture informatiche" e tecniche che permettono di integrare i sistemi; ma anche tutte le strutture che permettono, in modo collaborativo, di coniugare le aziende (fornitore – cliente) tra loro e con le strutture esterne (strade, hub, gestione dei rifiuti, ecc.).
- **Smart energy**: tutto questo sempre con un occhio accorto ai consumi energetici, creando sistemi più efficienti e riducendo gli sprechi di energia secondo i paradigmi tipici dell'energia sostenibile.

La chiave di volta dell'industria 4.0 sono i sistemi ciberfisici (CPS) ovvero sistemi fisici che sono strettamente connessi con i sistemi informatici e che possono interagire e collaborare con altri

sistemi CPS. Ciò sta alla base della decentralizzazione e della collaborazione tra i sistemi, che è strettamente collegata con l'essenza di industria 4.0.

Da uno studio di Boston Consulting viene fuori che la quarta rivoluzione industriale si incentra sull'adozione di alcune tecnologie definite abilitanti; alcune di queste sono "vecchie" conoscenze, concetti già presenti ma che non hanno mai oltrepassato il muro della divisione tra ricerca applicata e sistemi di produzione veri e propri; oggi, invece, grazie all'interconnessione e alla collaborazione tra sistemi, il panorama del mercato globale sta cambiando portando alla personalizzazione di massa, diventando di attrazione per l'intero settore manifatturiero.

Le nove tecnologie abilitanti definite da Boston Consulting sono [1]:

- **Advanced manufacturing solution**: sistemi avanzati di produzione, ovvero sistemi collegati e modulari che permettono flessibilità e performance. In queste tecnologie rientrano i sistemi di movimentazione dei materiali automatici e la robotica avanzata, che oggi entra sul mercato con i robot collaborativi o cobot.
- **Additive manufacturing**: sistemi di produzione additiva che aumentano l'efficienza dell'uso dei materiali.
- **Realtà aumentata**: sistemi di visione con realtà aumentata per guidare meglio gli operatori nello svolgimento delle attività giornaliere.
- **Simulazioni**: simulazione tra macchine interconnesse per migliorare i processi.
- **Integrazione orizzontale e verticale**: integrazione e scambio di informazioni tra tutti gli attori del processo produttivo.
- **Industrial internet**: comunicazione tra elementi della produzione, dentro e fuori l'azienda grazie all'utilizzo di internet.
- **Cloud**: implementazione di tutte le tecnologie cloud, come l'archiviazione online delle informazioni, l'uso del cloud computing, di servizi esterni di analisi dati, ecc. Nel cloud sono contemplate anche le tecniche di gestione di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti.
- **Sicurezza informatica**: l'aumento delle interconnessioni interne ed esterne aprono la porta a tutta la tematica della sicurezza delle informazioni e dei sistemi che non devono essere danneggiati dall'esterno.
- **Big data analytcs**: tecniche di controllo di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti che permettono previsioni o predizioni.

1.3 La quarta rivoluzione e i suoi effetti sul futuro

Finora le rivoluzioni industriali del mondo occidentale sono state tre: nel 1784 con l'avvento della macchina a vapore e di conseguenza con lo sfruttamento della potenza di acqua e vapore per

meccanizzare la produzione; nel 1870 con il via alla produzione massificata attraverso l'uso sempre più diffuso dell'elettricità, l'avvento del motore a scoppio e l'aumento dell'utilizzo del petrolio come nuova fonte energetica; nel 1970 con la nascita dell'informatica, dalla quale è scaturita l'era digitale destinata ad incrementare i livelli di automazione avvalendosi di sistemi elettronici e dell'IT (Information Technology). Quella che si sta vivendo ora è la quarta rivoluzione industriale, la più complessa e rivoluzionaria che ci sia mai stata [3].

Figura 1.1: Time-line delle rivoluzioni industriali

Esperti e osservatori stanno studiando come cambierà il lavoro, quali nuove professionalità saranno necessarie e quali invece presto potrebbero scomparire. Dalla ricerca "The Future of the Jobs", presentata al World Economic Forum 2016, è emerso che, nei prossimi anni, fattori tecnologici e demografici influenzeranno appieno l'evoluzione del mercato del lavoro. Alcuni (come la tecnologia del cloud e la flessibilizzazione del lavoro) stanno influenzando le dinamiche già ora e lo faranno ancora di più nei prossimi 2-3 anni. L'effetto sarà la nascita di 2 nuovi milioni di posti di lavoro, ma contemporaneamente se ne perderanno 7, con un saldo netto negativo di oltre 5 milioni di posti di lavoro. L'Italia ne esce con un pareggio (200mila posti creati e altrettanti persi), meglio di altri Paesi come Francia e Germania. A livello di gruppi professionali le perdite si concentreranno nelle aree amministrative e della produzione: rispettivamente 4,8 e 1,6 milioni di posti distrutti. Secondo la ricerca compenseranno in parte queste perdite l'area finanziaria, il management, l'informatica e l'ingegneria. Cambiano di conseguenza le competenze e abilità ricercate: nel 2021 il problem solving rimarrà la soft skill più ricercata, ma diventeranno più importanti il pensiero critico e la creatività [4].

1.4 Piano Industria 4.0 italiano

Il governo Renzi, seguendo l'esempio di Stati Uniti, Inghilterra, Germania e Giappone, ha posto in essere una serie di misure per incentivare gli investimenti funzionali alla trasformazione tecnologica. Il progetto, che ha stimato di generare una spesa tra gli 80 e i 90 miliardi di euro, ha preso il nome di "Piano nazionale industria 4.0" ed è stato sviluppato e presentato per la prima volta in Italia nel 2016 dal Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda. In questo piano erano previste una serie di agevolazioni fiscali da parte dello stato italiano che aiutassero le imprese a investire e rinnovarsi in ottica "Industry 4.0". Con il governo Conte c'è stato un rilancio di questo piano che è divenuto "Piano nazionale Impresa 4.0" rifinanziando gli sgravi e incentivi fiscali previsti nel precedente piano e cambiando alcuni strumenti per poterlo fare.

Capitolo 2

Robotica collaborativa

Nel passare degli anni c'è stata una evoluzione della robotica. Si è passati da una robotica che prevedeva grosse celle di sicurezza con robot potenti e veloci e pertanto pericolosi, che svolgevano lavori ripetitivi, precisi e con minimi tempi di ciclo, a una robotica più "smart", che fosse più di ausilio al uomo e che possa anche aiutarlo nella vita di tutti i giorni. Si è introdotta per l'appunto una robotica domestica, una robotica di precisione nella chirurgia ed è diventato sempre più diffuso l'uso di esoscheletri che sostenessero l'uomo. Nella robotica industriale c'è stata una grande evoluzione verso questa ottica introducendo sensori sui robot rendendo facile la loro programmazione e una serie di misure che consentissero un ampio impiego di robot al fianco dell'uomo nei cicli produttivi. Si è arrivato a robot che collaborano con l'uomo, detti appunto cobot.

La robotica collaborativa è uno dei perni dell'Industria 4.0, essa rientra pienamente nelle nove tecnologie abilitanti e in particolar modo nella prima ovvero "Advanced manufacturing solution". Questa tecnologia sta sempre più entrando nel processo produttivo delle aziende per le sue caratteristiche che verranno analizzate più avanti. Il piano Industria 4.0 varato dal Governo prevede l'inserimento regolare e non aggressivo di impianti e robot dotati di Intelligenza Artificiale all'interno delle fabbriche. I cobot stanno aiutando a risolvere criticità e problemi del ciclo produttivo, apportando miglioramenti anche in termini di risparmio di energia e/o di tempo.

2.1 I vantaggi dei cobot

Un Cobot o Co-robot (derivante da "collaborative robot") è un robot pensato per lavorare a distanza ravvicinata con gli operatori. Ciò trasmette un contrasto rispetto alla maggior parte dei robot industriali adottati fino al 2008, i quali erano progettati per operare in maniera autonoma o con una guida limitata e protetti da barriere. I cobot rispettano distanze di sicurezza tra loro e tra le persone, arrivando a decelerare all'ingresso dell'operatore nell'area di azione e a bloccarsi al minimo contatto. I tempi e le distanze degli arresti sono programmabili e personalizzabili, garantendo così la massima flessibilità operativa. Questo consente a tale tipo di soluzioni di svolgere compiti anche molto complessi, interagendo con i colleghi umani in tutta sicurezza. Ciò è possibile grazie a una sensoristica di ausilio di cui sono dotati che permette di rilevare ciò che sta attorno. Hanno sensori di coppia e forza sui singoli giunti per non eccedere di forza e garantire una sicurezza nell'ambiente circostante, possono avere limitazioni nelle coppie e velocità applicabili e anche una pelle capacitiva

e sensori di prossimità per rilevare la presenza umana. Una delle caratteristiche fondamentali di un cobot è che esso sia leggero e abbia forme tondeggianti e prive di spigoli e organi di ausilio al di fuori del braccio robotico in modo tale che in caso di urto con l'uomo non gli arrechi gravi danni. Essi sono spesso anche dotati di telecamere e sistemi di visione per rendere il loro impiego più flessibile in svariati campi della produzione.
Di seguito si elencano le principali caratteristiche [5] che ha un collaborativo che rappresentano i suoi punti di forza.

- Interagiscono con gli operatori e non necessitano di gabbie perimetrali "reali"; grazie a dimensioni limitate possono essere integrati in qualsiasi linea produttiva senza aver bisogno di modificarne sostanzialmente il layout;
- Il loro peso, che va da 10 a 30 kg, consente di trasportarli facilmente da una postazione all'altra grazie a dei semplici carrelli; sono facili da programmare al primo utilizzo grazie a software dedicati e alla modalità
- "free drive", che permette di insegnargli un percorso semplicemente spostandoli "a mano" nello spazio per impostare un numero minimo di waypoint;
- La riprogrammazione è molto rapida, perché è possibile richiamare dei percorsi già salvati con un "tap" sul display di guida (teach pendant);
- Possono essere programmati da qualsiasi addetto opportunamente formato: non è necessario ricorrere alla consulenza di personale esperto;
- Sono in grado di "imparare dall'esperienza" che fanno durante la loro attività, per ottimizzare l'efficienza del lavoro che compiono;
- Lo stesso braccio robotico, opportunamente attrezzato con dei terminali (end-effector) diversi a seconda delle situazioni, può svolgere le mansioni più svariate. Si va da ventose, a pinze, ganci ... ecc, tutte ovviamente personalizzabili a seconda delle esigenze;
- Non richiedono una progettazione specifica che, tipicamente, necessita di tempi lunghi e costosi;
- Hanno costi che partono da poche decine di migliaia di euro (molto contenuti);
- Il ROI (acronimo di Return on Investment) è di solito molto rapido, nell'ordine di 12 mesi ma spesso anche più breve.

Da come si intuisce le possibili mansioni da affidare a un cobot sono innumerevoli. Trovano ampio impiego in operazioni ripetitive, usuranti, pesanti o che richiedono particolare precisione, con l'obiettivo di migliorare, e non di poco, l'efficienza produttiva: si va da operazioni di pick and place a operazioni verniciatura, assemblaggio, incollaggio, avvitatura ... ecc.

Figura 2.1: Esempi di possibili applicazioni

Ci sono tuttavia anche dei svantaggi nel usare dei cobot, infatti non sempre vengono scelti nelle varie applicazioni: velocità più bassa, minori carichi paganti, minori precisioni.

2.1.1 Differenze tra cobot e vecchi robot

Enormi sono le differenze con i classici robot che si usavano prima dell'introduzione della robotica collaborativa:

- Innanzitutto i robot funzionano a grandi velocità e scaricano grandi forze, questo implica che debbano lavorare in gabbie recintate e lontani dagli uomini.
- La loro programmazione è lunga, costosa e difficile. Ciò li rende di fatto irriprogammabili, svolgeranno un solo lavoro perdendo di flessibilità.
- Masse e volumi importanti, quindi richiedono grandi sforzi di trasporto e grandi spazi di allocazione.

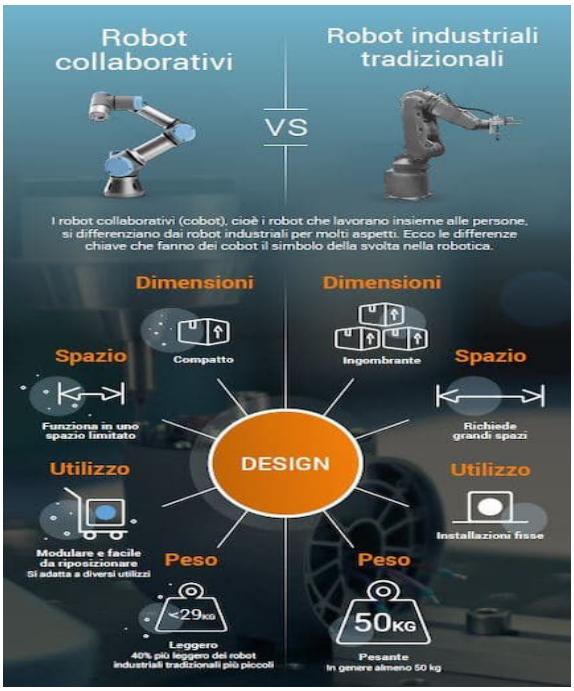


Figura 2.2: Confronto tra cobot e robot

2.1.2 Le 4 tipologie di operazioni collaborative

Esistono principalmente 4 tipologie di operazioni collaborative [6] che tenendo conto delle norme di sicurezza permettono al Cobot di poter collaborare con gli operatori. Le normative ISO 10218-1 e -2 definiscono i 4 diversi metodi per ottenere operazioni collaborative, mentre l'ISO \TS 15066 aggiunge in termini di Safety & Security ulteriori linee guida e alcuni requisiti aggiuntivi.

- **Arresto monitorato**: Un robot tradizionale viene adoperato all'interno di una recinzione. Una persona può entrare nell'campo di lavoro attraverso un'apertura (interruttore della porta, barriera fotoelettrica o soluzione di sicurezza della telecamera che identifica che una persona sta entrando). All'ingresso dell'operatore, il robot viene messo in pausa. Una funzione di arresto di sicurezza viene utilizzata mentre la persona entra e fa il suo lavoro (ad es. Carico / scarico di pezzi). Quando la persona lascia l'area di lavoro, il robot può riprendere il funzionamento automatico. Chiamare questo metodo collaborativo sembra un po' strano, ma gli standard lo definiscono collaborativo perché l'elettricità ai motori dei robot viene mantenuta mentre è presente un individuo. La sicurezza dei Cobot è tale per cui non sono previste barriere e la messa in pausa non deve essere programmata perché avviene in automatico.

- **Guida manuale ed insegnamento delle traiettore**: I robot collaborativi possono essere movimentati lungo un percorso o una traiettoria con la sola forza di una mano; il robot

memorizza il percorso e lo può ripetere autonomamente

- **Monitoraggio della velocità e della separazione**: Questo metodo è simile allo "stop di sicurezza monitorato" ma, invece di mettere in pausa il robot, la procedura riduce la velocità del robot in base alla distanza tra il robot e l'operatore. Un modo per farlo è utilizzare una telecamera che determina il divario in modo sicuro. Un altro modo è utilizzare una pellicola sensorizzata integrata nel robot, che percepisce quando una persona è vicina al robot e quindi lo blocca prima che questo arrivi a toccare l'operatore. Il Cobot, essendo dotato di appositi sensori, si muove mantenendo sempre una distanza di sicurezza da cose e persone, arrivando a arrestarsi e a ripartire da solo.

- **Limitazione di potenza e forza**: Una caratteristica unica dei Cobot è la limitazione della potenza e della forza. I Cobot, infatti, sono sensibili al movimento e quindi si fermano prima di mettere a rischio l'operatore. La regolazione della velocità, della forza e della pressione, infatti, sono determinanti e sono le caratteristiche peculiari dei robot collaborativi.

2.2 Andamento del mercato mondiale della robotica

Il mercato della robotica e con esso quello della cobotica fin dal 2009 è sempre stato un mercato in crescita tuttavia nell'ultimi due anni i numeri testimoniano una crescita altalenante, un trend iniziato già prima della pandemia e che ha portato a un calo nel 2019 del numero di robot installati. Secondo i dati rilasciati dall'International Federation of Robotics (Ifr), infatti, già nell'ultimo anno dell'era pre-Covid si era avuta una flessione del 12% che ha interrotto una striscia positiva di aumento costante iniziata nel 2009. Sicuramente ci sarà una recupero rispetto al 2020, che ha risentito non solo della crisi causata dal Covid, ma anche della pregressa contrazione del commercio alimentata dalla trade war tra Usa e Cina.

Il futuro dovrebbe tornare a far registrare il segno positivo. La società di ricerca Robo Global prevede che il mercato mondiale della robotica industriale crescerà da 45 miliardi di dollari nel 2020 a 73 miliardi di dollari nel 2025. Senza tener conto che entro la fine di quest'anno la base mondiale installata di robot industriali supererà i 3,2 milioni di unità, il doppio rispetto al 2015.

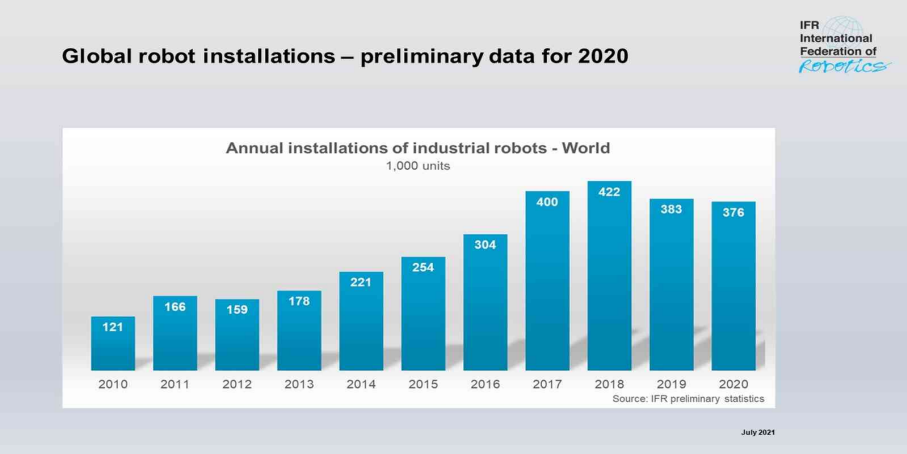


Figura 2.3: Numero di installazioni annuali nel mondo di robot industriali (fonte IFR)

Stando ai dati dell'ultimo rapporto Ifr, nel manifatturiero risultano installati 2,7 milioni di robot: più della metà (1,68 milioni) nel sud est asiatico, mentre 580mila sono utilizzati dall'industria europea. Al terzo gradino del podio troviamo nord e sud America, dove ne sono presenti 389mila. A trainare le vendite è la Cina, con 140mila nuove unità installate, seguita da Giappone, Usa, Corea del Sud e Germania. Sempre secondo l'Ifr, l'Italia è il sesto Paese al mondo per nuove unità installate (circa 11mila nel 2019) si conferma la seconda manifattura in Europa come utilizzatore, dietro alla Germania, con 74.400 unità e al decimo posto per indice di densità robotica (2,12%),quarta in Europa dopo Germania (3,46%), Svezia (2,77%) e Danimarca (2,43%).

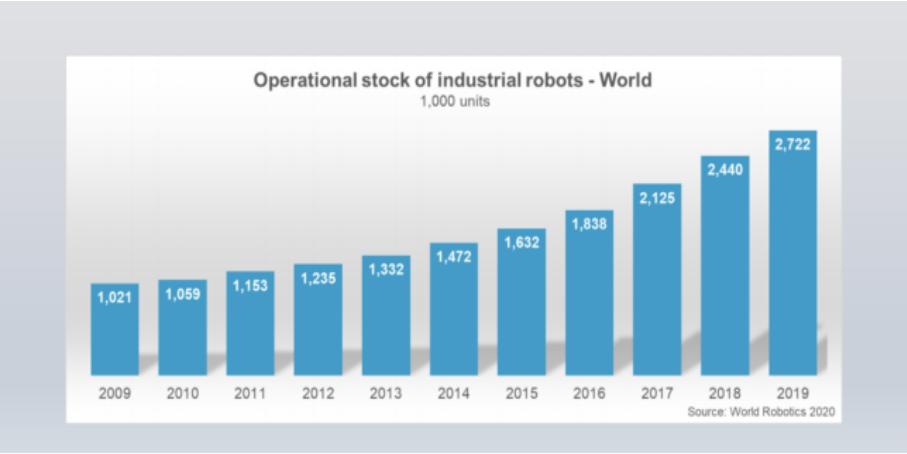


Figura 2.4: Numero totali di robot installati (fonte IFR)

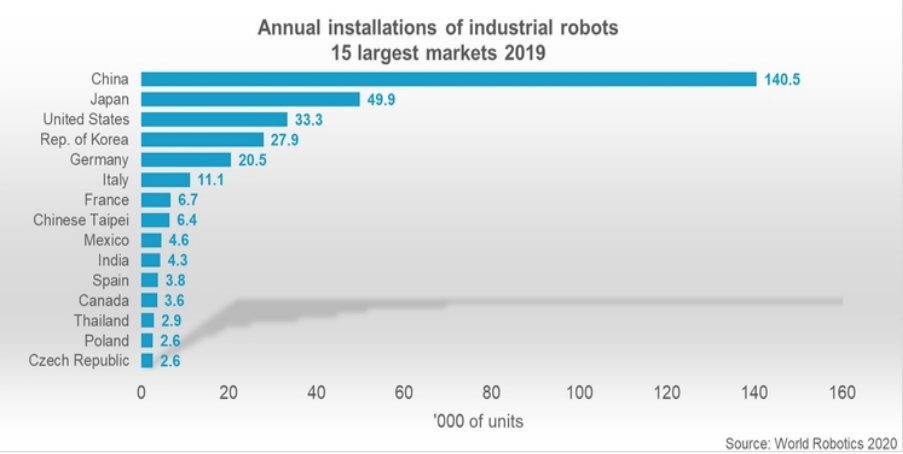


Figura 2.5: Installazione per paese nel 2019 (fonte IFR)

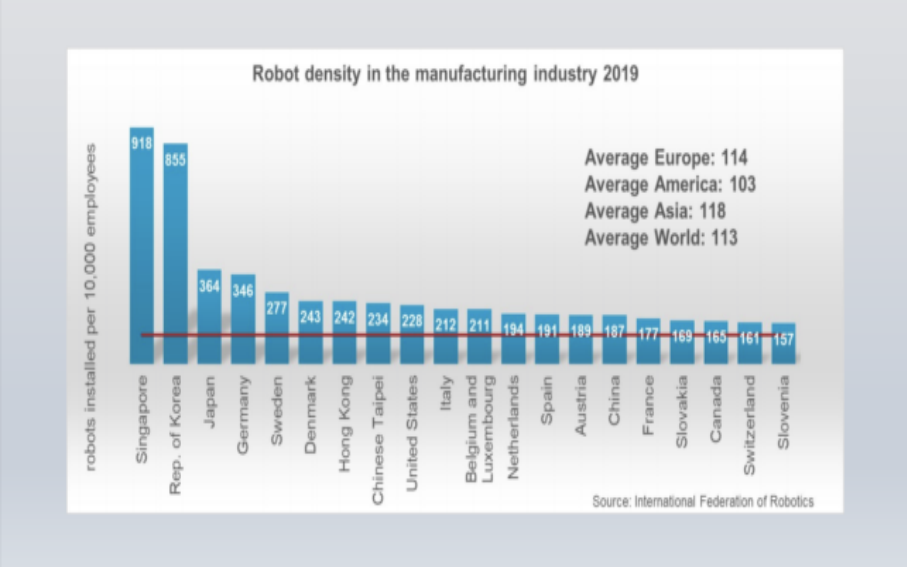


Figura 2.6: Installazione medie per paese nel 2019 (fonte IFR)

Un discorso a parte va riservato ai cobot, la loro crescita non si è mai fermata negli anni e continuerà, secondo il Research and Markets di Dublino, a un ritmo medio annuale del 39,8% fino al 2027, e che sta già rivoluzionando l'automazione di fabbrica, tanto da costituire un fattore anticiclico. Nel 2019, infatti, a fronte del brusco calo delle vendite globali dei robot industriali (dovuto in primis ai problemi dell'automotive, mercato di maggior sbocco), i cobot hanno registrato un incremento dell'11%. Il mercato dei cobot diventerà sempre più influente nei prossimi dieci anni. Un'analisi della società di consulenza Abi Research rileva che le vendite di bracci robotici

collaborativi raggiungeranno gli 11,8 miliardi di dollari entro il 2030, con un significativo aumento rispetto ai 711 milioni di dollari del 2019. Un valore che cresce ulteriormente se si tiene in considerazione anche delle entrate legate al software e agli accessori (end-of-arm tooling, utensili da presa e lavorazione per montaggio su braccio). Con questa definizione più ampia del mercato, il mondo dei cobot vale poco più di 1 miliardo di dollari nel 2019 e varrà 24 miliardi di dollari entro il 2030, con una crescita media annua del 28,6% [7].

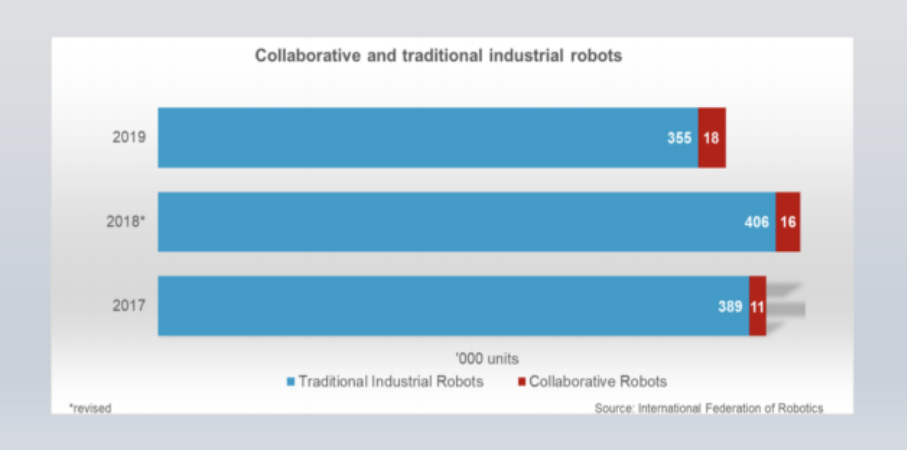


Figura 2.7: Numero di cobot negli anni (fonte IFR)

2.3 Principali produttori di Cobot

Nell'attuale mercato della robotica collaborativa si sono inseriti diversi produttori, non molti. Ognuno di essi si è conquistata una parte del settore proponendo prodotti innovativi e che si diversificano per alcune peculiarità. L'attuale principale produttore di cobot e che detiene la più grossa fetta di mercato è l'azienda danese "UNIVERSAL ROBOT" che detiene il 60%. Ci sono altri importanti costruttori di cobot, se ne riportano di seguito i principali:

- KUKA
- ABB
- FANUC
- COMAU (gruppo FCA)
- Omron
- Yaskawa

2.4 Robot mobili

Fino a non molto tempo fa, i tradizionali AGV (automated guided vehicles) rappresentavano l'unica alternativa per automatizzare i compiti di trasporto interno. Gli AGV sono una componente familiare in grandi installazioni fisse, dove c'è esigenza di consegne di materiale che siano costanti e ripetitive e dove c'è la possibilità di fare importanti investimenti iniziali e ROI a lungo termine. Oggi, però, gli AGV patiscono la concorrenza dei più sofisticati, flessibili ed economici robot mobili autonomi (AMR). Se è vero che AGV ed AMR servono entrambi per portare materiale da un punto ad un altro, è anche vero che questa è l'unica analogia tra loro.

Figura 2.8: Un AMR in funzione

Un AGV ha un'intelligenza di bordo base e minima, può solo eseguire semplici istruzioni. Per navigare ha bisogno di essere condotto da cavi, bande magnetiche o sensori, che di solito richiedono estese (e costose) modifiche nella configurazione dell'impianto, durante le quali può essere necessario fermare la produzione. Un AGV si limita a seguire questi percorsi fissi, i quali richiedono ulteriori costi e nuovi cambiamenti all'impianto, nel caso in cui debbano essere cambiati. Un AGV può rilevare ostacoli sul suo tracciato, ma non può aggirarli, quindi si arresta semplicemente finché l'ostacolo non è rimosso. Un AMR, al contrario, naviga usando delle mappe che possono essere caricate direttamente sul robot, o che questo costruisce autonomamente in loco. Questa capacità può essere paragonata a quella di un'auto munita di GPS con una serie di mappe pre-installate. Una volta che gli indirizzi di casa e lavoro del proprietario vengono impostati, il GPS crea il tragitto più breve, basandosi su semplici posizioni sulla mappa. Un AMR funziona in modo simile, quando le posizioni dei punti di carico e scarico vengono impostate. Il sofisticato software di un AMR usa i dati forniti da videocamere, sensori e scanner laser montati sul robot per rilevare l'ambiente circostante e scegliere il percorso migliore verso il suo obiettivo. Funziona in modo completamente autonomo e, se muletti, bancali persone o altri ostacoli si trovano sul suo tragitto, l'AMR li aggira in tutta sicurezza, utilizzando il miglior percorso possibile. Tutto questo garantisce che il flusso di materiale rimanga puntuale, ottimizzando la produttività. Questa autonomia operativa rende

gli AMR molto più flessibili degli AGV, i quali sono obbligati a seguire una linea fissa, di solito installata sul pavimento. Ciò significa che le loro applicazioni sono limitate ed un AGV esegue lo stesso compito di consegna per tutto il tempo in cui resta in servizio. I cambiamenti sono semplicemente troppo costosi e impattanti per essere economicamente fattibili.

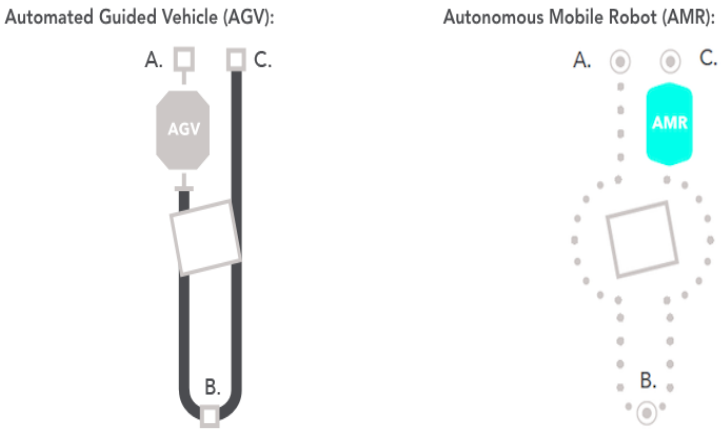


Figura 2.9: Differenza principale tra un AGV e un AMR

Un AMR, invece, ha solo bisogno di semplici modifiche software per adattarsi a nuovi task, in modo che il robot possa adempiere una varietà di compiti in posizioni diverse, compiendo piccoli aggiustamenti per rimanere al passo con le esigenze della produzione in ambienti in variazione.

I compiti di un AMR possono essere controllati tramite l'interfaccia del robot o configurati dal software di gestione della flotta, il quale gestisce automaticamente la priorità degli ordini e l'assegnamento dei robot ai compiti per i quali sono più indicati, basandosi sul loro stato e posizione. Una volta che una missione viene stabilita, non c'è bisogno che il lavoro del robot sia organizzato dal personale, il quale può quindi impegnarsi su compiti di maggior valore che contribuiscono al successo della compagnia. La flessibilità degli AMR è essenziale per il moderno settore manifatturiero, che richiede agilità e flessibilità nel caso in cui ci sia il bisogno di apportare modifiche ai prodotti o alle linee di produzione. Gli AMR si adattano facilmente ad agili modelli produttivi, in impianti produttivi di tutte le dimensioni. Se la linea di produzione subisce modifiche, è sufficiente caricare la nuova mappa nell'AMR o permettergli di crearne una nuova esso stesso, in modo che possa essere impiegato immediatamente per nuovi compiti. Questa capacità fornisce ai proprietari il completo controllo del robot e delle sue funzioni. Piuttosto che essere limitati dalla mancanza di flessibilità delle infrastrutture richieste dagli AGV, le organizzazioni possono facilmente re-impiegare i robot stessi seguendo l'evoluzione delle proprie necessità, in modo da ottimizzare la produzione anche in ambienti dinamici [8].

Sebbene gli AMR contengano una tecnologia molto più avanzata rispetto agli AGV, i primi rappresentano di solito un'alternativa molto più economica. Gli AMR non hanno bisogno di cavi, bande magnetiche o altre costose modifiche allo stabilimento, il che significa che il loro inserimento

è più semplice e veloce; un processo senza cambiamenti costosi ed impattanti per la produzione. Siccome gli AMR possono essere impiegati in modo facile e veloce, il loro impatto sull'efficienza è quasi immediato. Con un basso costo iniziale ed una veloce ottimizzazione dei processi, questi offrono un ritorno sull'investimento molto veloce, spesso inferiore a sei mesi. La crescita dell'impiego di AMR può essere organizzata in modo da collimare con quella del business, con costi aggiuntivi minimi

Di seguito si riportano le principali caratteristiche della robotica mobile

- Percezione grazie ai sensori
- Capacità di adattamento in caso di cambiamenti nelle condizioni ambientali
- Navigazione, pianificazione e azione autonome
- Software /programmazione orientati al compito

L'struttura di ogni robot mobile è costituita oltre che dal software e dall'elettronica di controllo anche da sensori e attuatori. I sensori servono ad apprendere varie informazioni e dati necessari alla localizzazione e alla organizzazione dei movimenti. I sensori all'interno del robot – ad esempio indicatori di tensione, termometri e ricevitori radio – forniscono informazioni sull'attuale stato del sistema. I sensori esterni integrati nella robotica mobile, quali pulsanti, lettori di codici a barre, sensori di coppia e di accelerazione, forniscono al sistema i dati necessari per la sequenza dei movimenti.

Gli attuatori sono responsabili dell'attuazione dei comandi. Anche loro agiscono internamente o esternamente. Gli attuatori interni variano lo stato del sistema; ad esempio ventola e riscaldamento regolano la temperatura interna. Gli attuatori esterni invece, quali motori e pompe, permettono al robot di muoversi o di svolgere attività tramite manipolatori, come il braccio del robot.

Nell'campo delle produzioni industriali la robotica mobile trova un uso sempre più abituale nel settore dei trasporti. Se per la produzione occorre trasportare i materiali necessari verso una determinata macchina per la lavorazione o pezzi in magazzino, speciali robot si occupano del trasporto. La modernizzazione di strutture e processi logistici aumenta l'efficienza, riduce i costi a lungo termine e contribuisce a creare un ambiente di lavoro più affidabile. Quale elemento di collegamento tra le singole fasi di lavoro, la robotica mobile costituisce già oggi una componente influente della cosiddetta fabbrica intelligente.

Una strategia per reagire alla nuova realtà potrebbe essere quella di introdurre nei propri flussi uno o più robot mobili autonomi. Gli AMR sono progettati per eseguire compiti altamente stressanti, ridurre i colli di bottiglia della produzione e i ritardi causati dalla carenza di lavoratori dovuta al social distancing. Gli operatori non dovranno più curarsi del trasporto interno, utilizzando il tempo risparmiato per svolgere compiti più importanti a completo beneficio dell'azienda. Continuità dei flussi produttivi vuol dire inoltre creare un ambiente di lavoro più sicuro minimizzando le assenze causate dagli infortuni sul lavoro. Combinando l'abilità umana con l'affidabilità e l'autonomia robotica, l'industria del largo consumo può creare un modello nuovo che risulti ottimale, che generi valore vero e attrattivo per il business [9].

2.4.1 Principali fornitori di AMR presenti oggi sul mercato

Secondo un'indagine di Interact Analysis la pandemia trainerà l' aumento dei robot mobili nel lungo periodo. I "mobot" continueranno ad affermarsi in ambito manifatturiero e conquisteranno anche il settore della logistica. Le vendite di robot mobili autonomi (AMR) supereranno i ricavi dei più tradizionali AGV.

I ricavi delle vendite hanno toccato i 2,4 miliardi di dollari nel 2020 e aumenteranno di un ulteriore 50% nel 2021, poiché l'impatto della pandemia comporterà una maggiore domanda di automazione mobile.

Più in dettaglio le vendite di AGV, i veicoli autonomi che possono navigare solo grazie all'ausilio di infrastrutture fisiche (marcatori, guide ottiche o magnetiche, prevalentemente), cresceranno meno rispetto a quelle dei più avanzati robot autonomi mobili (AMR), che possono navigare in autonomia, senza bisogno di marcatori esterni o di infrastrutture. Interact Analysis prevede infatti per quest'anno una crescita del fatturato dell'11% per gli AGV e del 45% per gli AMR, con una crescita media del 24% in tutto il settore. Per completezza, va detto che la crescita del settore per il 2020 prevista prima della pandemia era del 60%. Tuttavia, spiegano gli analisti, il COVID-19 sarà un cambiamento per il settore nei prossimi anni, contribuendo a un aumento "vertiginosa" fino al 2024 in quanto a causa dell'epidemia sarà richiesta una sempre maggiore automazione dei processi e più efficienza [10].

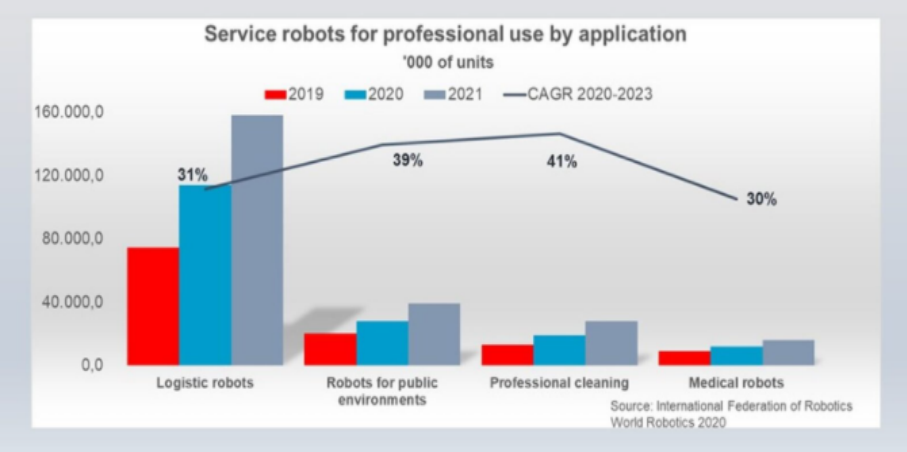


Figura 2.10: numero di robot mobili negli anni futuri divisi per settore (fonte IFR)

Si riporta di seguito i principali fornitori di queste tecnologie presenti sul mercato, nella fetta degli "others" rientrano tutti i fornitori con fatturato sotto i 5 milioni di euro e ricoprono il 60% di tutta la torta [11].

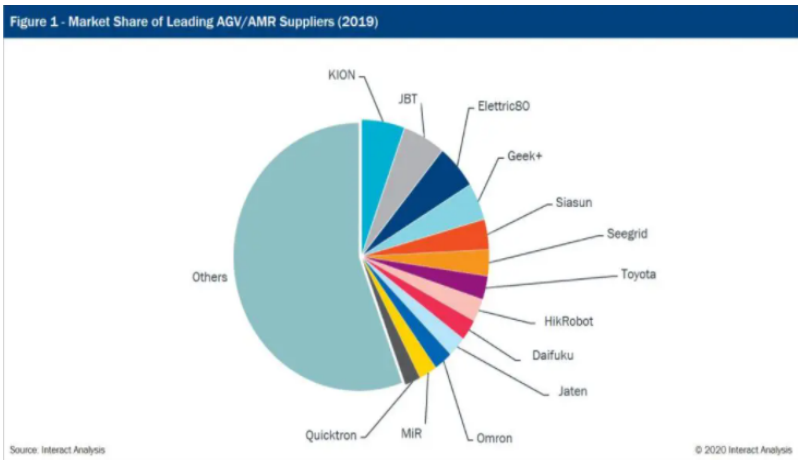


Figura 2.11: Fornitori di AMR/AGV (fonte Interact Analysis)

Capitolo 3

Integrazione tra un AMR e un manipolatore cobotico

In questo capitolo si andrà a introdurre una nuova tecnologia nascente e in forte sviluppo a partire dagli ultimi due anni: ovvero quella di integrare tra loro un autonomous mobile robot con un manipolatore cobotico.

L'idea di base è quella di sfruttare le potenzialità di un cobot invece che su una postazione fissa su una postazione mobile: a seconda di dove è richiesto il task il cobot andrà a lavorare. La postazione mobile è resa possibile grazie al fatto che il cobot è fissato sopra l'AMR. L'AMR quindi trasporta il cobot nella destinazione di lavoro e poi il cobot entrerà in funzione. Si riporta sotto una soluzione di tale genere realizzata con un AMR Mir e un cobot UR che rende subito l'idea della tecnologia e ne esemplifica le sue potenzialità.

Figura 3.1: Un Mir integrato con un UR

Le capacità di questo sistema sono molteplici: può essere impiegato per operazioni di pick and place ad esempio. Il cobot afferra una serie di oggetti da una parte del magazzino e li può caricare sopra l'AMR. Dopodiché l'AMR si muoverà fino a raggiungere la postazione in cui rilasciare gli oggetti e lì il cobot rientrerà in funzione depositando la merce. Un'altra possibile applicazione

potrebbe essere quella di far effettuare al cobot diversi task a seconda di dove andrà a lavorare. Le potenzialità sono innumerevoli e può rivoluzionare tutto il sistema di material handling aziendale. Come riportato nella sezione 2.4 l'AMR ha una grande capacità di guida autonoma rendendo di fatto questo sistema estremamente flessibile e facilmente adattabile ad ogni configurazione aziendale.

Un fattore fondamentale da tenere in considerazione per questa tecnologia è la capacitò di carico dell'AMR sottostante, di fatto essa pone un grande vincolo al cobot che può essere montato sopra e il materiale complessivo che si può trasportare nelle varie operazioni. Inoltre un altro fattore fondamentale è quello della capacità della batteria dell'AMR: si ricorda che tutto il sistema e relativi sensori deve essere alimentato tramite essa poiché non sono previsti cavi di alimentazione. Il sistema a batteria esaurita dovrà tornare in maniera autonoma alla stazione di carica.

Oggi in commercio si trovano diversi AMR di diversi costruttori con diverse capacità di carico: si va dai 60 Kg ai 90 o 100 ai 250 o 500 Kg per arrivare per fino ai 1000 o 1500 Kg.

Combinando queste due tecnologie di fatto si uniscono i grandi vantaggi offerti dai cobot a quelli di un robot mobile a guida autonoma raggiungendo il più alto grado di flessibilità presente ad oggi sul mercato.

Un aspetto da non tralasciare riguarda la facilità e rapidità con cui oggi si possono programmare tali sistemi, ciò vale sia per il robot mobile che per il cobot.

3.1 Principali soluzioni presenti sul mercato ad oggi

A partire da due anni a questa parte tutti i più importanti costruttori di robot si sono mossi verso questa integrazione offrendo sul mercato sistemi complessi e altamente competitivi, da Kuka, Omron a UR insieme a Mir. Inoltre è recentissima la notizia dell'acquisizione da parte di ABB di ASTI, una delle più grandi aziende produttrici di AMR.

Si vedranno di seguito i principali prodotti offerti da questi costruttori in tal materia.

3.1.1 KUKA

Kuka ha rilasciato il modello kuka KMR iiwa. KMR è un acronimo che indica KUKA Mobile Robotics. KMR iiwa è una combinazione tra il robot leggero sensibile LBR iiwa e una piattaforma mobile e flessibile.

Figura 3.2: KUKA iiwa

- Combinabile: il sistema modulare KMR iiwa offre varie alternative di combinazioni di tecnologia di robot, piattaforme mobili e componenti industriali.
- Sensibile: sette speciali sensori di coppia su ogni asse del robot leggero LBR iiwa lo rendono estremamente sensibile all'ambiente circostante. Naviga in modo sicuro e senza barriere di protezione: al minimo contatto esterno si arresta immediatamente.
- Autonoma: la piattaforma mobile può navigare in modo completamente autonomo grazie agli scanner laser. Controlla l'ambiente circostante e se una persona o un oggetto si trovano sul suo percorso, reagisce all'istante.
- Agile: le ruote Mecanum sviluppate specificatamente consentono alla piattaforma mobile di eseguire movimenti omnidirezionali e rotazioni di 360 gradi. Una ruota è formata da diversi rulli, ognuno dei quali è allineato con un'angolazione di 45 gradi rispetto all'asse. Questa massima mobilità abbrevia i tempi di ciclo e riduce i tempi vuoti nel processo di produzione.
- Precisa: KMR iiwa raggiunge una precisione di posizionamento pari a ± 5 millimetri anche in spazi ristretti.

KUKA attualmente è l'unica azienda che fornisce questa soluzione già assemblata e funzionante mentre gli altri produttori forniscono AMR e COBOT separatamente e poi sono da integrare a carico del cliente o da parte di un soggetto terzo come un system integrator [12]

3.1.2 Mir in partnership con UR

Mir produttore di AMR e UR primo produttore al mondo di cobot hanno instaurato una partnership per far si che i loro prodotti possano essere integrati. C'è anche un azienda: "Enable robo-

tics" che produce un modulo denominato "E-FLEX" per integrare i due sistemi molto facilmente. Possono accoppiarsi diverse taglie di Mir con diverse taglie di UR.

Figura 3.3: Un Mir integrato con un UR

3.1.3 Omron

Omron produttrice sia di AMR con la sua famiglia "LD" che può trasportare dai 60 Kg, 90, 250 e fino a 1500 Kg e produttrice insieme a TECHMAN di manipolatori cobotici con la famiglia "TM" non offre sul mercato direttamente questa soluzione già pronta, ma sono diversi i system integrator che poi l'hanno sviluppata unendo tra loro un LD90 con un TM5 o TM12 o meglio ancora un LD250 con un TM12 per maggiori prestazioni. Omron ha anche redatto una guida i da diffondere internamente all'azienda e per i clienti in cui viene spiegato come effettuare l'integrazione tra i due sistemi e come effettuare la programmazione dei due componenti.

Si riporta di seguito un'immagine in cui si può notare il prodotto di cui si è appena discusso:

Figura 3.4: Integrazione di un AMR della famiglia "LD" con un cobot "TM" Omron

3.2 La soluzione da progettare in Joytek

L'azienda Joytek ha avuto l'esigenza di progettare e in seguito realizzare questo nuovo tipo di tecnologia appena descritta in quanto un cliente ha avuto il bisogno di introdurre questa tecnologia nel suo stabilimento per ciò che riguarda il material handling.

Il lavoro di tirocinio e tesi riguarda esattamente l'integrazione di un AMR con un cobot per arrivare a costruire un MoMa:mobile manipulator.

Il cliente finale, una delle più grandi multinazionali al mondo nel ambito food and beverage, ha richiesto un prodotto che fosse in grado di spostarsi autonomamente all'interno del magazzino e che potesse recarsi in una postazione, fermarsi, prendere degli oggetti e spostarli da una parte all'altra dello scaffale oppure posizionarsi tra due linee di produzione e prendere oggetti da una linea e trasferirli sull'altra che si trova affianco. L'altra esigenza è che il robot riuscisse ad afferrare anche oggetti posti a una determinata altezza quindi si è pensato di posizionare una colonna mobile di sollevamento sopra l'AMR e poi successivamente il cobot sopra a questa colonna. In tal modo si amplia in altezza l'area di lavoro del cobot.

Di importanza non secondaria è il fatto che il sistema non deve prendere l'oggetto da una parte, caricarlo su di se e trasportarlo spostandosi dentro lo stabilimento e poi rilasciarlo sulla destinazione finale, ma deve solo movimentare l'oggetto da un punto all'altro grazie al manipolatore, lasciando fermo l'AMR.

Ciò permette quindi di non considerare il peso dell'oggetto da spostare nella massa che trasporta l'AMR poiché da quando l'oggetto viene afferrato a quando viene rilasciato il mobile robot sarà sempre in stand-by.

Inizialmente si è fatta una ricerca di mercato per capire le varie soluzioni presenti sul mercato e come poter sviluppare questo MoMA La Joytek ha una stretta collaborazione con Omron inoltre in sede era già disponibile un AMR Omron, in particolare il modello LD90, per tanto si è deciso di procedere sviluppando una soluzione a partire da questo AMR: Di conseguenza è stato scelto di montare sopra un cobot sempre Omron altrimenti ci sono problemi di compatibilità.

Per procedere con la progettazione sono stati presi spunti già da alcuni modelli integrati Omron di MoMa presenti sul mercato che sono simili a quelli riportati in figura 3.4 tuttavia ci sono delle modifiche sostanziali da fare a quelle soluzioni poiché sono state progettate per compiere compiti totalmente differenti da quelli richiesti dal cliente. Man a mano che ci si addentra nella trattazione si entrerà nel dettaglio di queste differenze e quindi si spiegheranno le soluzioni adottate per farne fronte.

Come cobot Omron da integrare sopra l'AMR si sono valutate e portati avanti in parallelo due soluzioni: la prima montando un TM5 e la seconda montando un TM12.

Ovviamente sono robot identici ma di dimensioni e peso diverso che si diversificano per la massima estensione raggiungibile e il massimo carico sollevabile. Per maggiori approfondimenti sulle caratteristiche tecniche dei due robot si faccia riferimento al capitolo 6

Il problema principale di cui bisogna tener conto e di cui in seguito verrà sviluppata ampia trattazione per spiegarlo e analizzarlo è quello della stabilità dell'AMR quando esso è fermo e il cobot è in movimento e anche la stabilità di tutto il sistema quando il cobot è nella posizione di homing e l'AMR in movimento.

Ovviamente per motivi di sicurezza non si potrà mai verificare il movimento contemporaneo di AMR e cobot, dovrà essere installato un sensore che rileverà quando il cobot è arrivato nella posizione di homing e quindi l'AMR potrà partire altrimenti l'AMR rimarrà bloccato

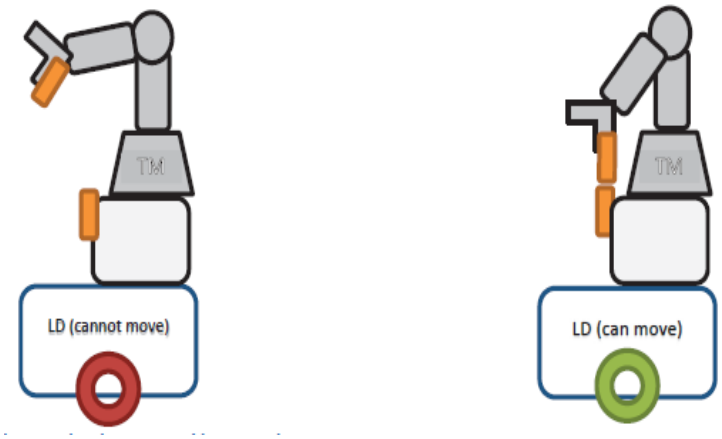


Figura 3.5: Posizioni in cui l'AMR può muoversi e non muoversi

Per far fronte alla stabilità quando il cobot è in movimento e l'AMR fermo si è pensato fin da subito di allargare l'impronta di appoggio a terra dell'AMR con dei "piedini" estraibili che vengono azionati quando il cobot entra in funzione. Verrà studiato e illustrato in seguito il cinematismo di apertura di questi "piedini". Prima tuttavia è stato verificato che tale allargamento occorresse tenendo conto dei carichi da spostare e accelerazioni che si vogliono usare. Nei capitoli successivi si approfondirà tale tema.

L'altro problema principale è quello di contenere il più possibile il peso. Si ricorda infatti che il modello di AMR disponibile può trasportare al massimo 90 Kg e già riducendo al minimo i componenti presenti al suo di sopra si hanno come masse:

- massa TM5:22.6Kg oppure TM12:33.3Kg
- massa Piastra:16Kg (ipotesi approssimativa di primo calcolo)
- massa Controller:13.5Kg
- massa Colonna:10Kg
- massa ipotizzata di eventuale cinematismo di allargamento pianta:4Kg (per ogni cinematismo)

quindi si arriva facilmente al limite dei 90 Kg .

L'ultimo fattore da tenere in considerazione è quello di far rientrare il baricentro complessivo di tutto ciò che viene messo sopra l'AMR dentro lo spazio di sicurezza definita da Omron. Lo spazio indicato come si vedrà vale per condizioni di massima velocità e accelerazione imprimibili all'AMR . Tale aspetto verrà trattato approfonditamente in una sezione dedicata e influenzerà l'altezza massima della colonnina di sollevamento.

Si vedrà in seguito anche come fornire alimentazione al cobot sfruttando la batteria dell'AMR e i tempi stimati di durata della batteria e di ricarica di essa.

Capitolo 4

Specifiche da osservare per l'integrazione di LD90 con TM

In questo capitolo si andranno a riportare alcune specifiche e considerazioni da rispettare per un corretto funzionamento del sistema LD90+TM12 (oppure TM5) Omron.

Sono linee guida suggerite dalla Omron stessa ma non ufficiali e che non garantiscono la sicurezza del sistema [13].

4.1 Safety

Si esaminano ora alcuni punti salienti d tenere in considerazione per quanto riguarda l'aspetto sicurezza dell'intero sistema e le possibili interazioni con l'uomo.

- Idealmente, il sistema di sicurezza permetterebbe al TM di essere trattato come un carico utile sicuro e fisso mentre LD è in movimento, e LD possa essere trattato come una postazione fissa quando il TM è in movimento. Per alcune applicazioni uniche, si può desiderare che il TM esegua qualche funzione mentre lo LD è in movimento. Questo è fattibile se l'applicazione non consente alle persone di entrare nell'area di lavoro,ma se ciò non viene garantito allora si deve installare qualche sensoristica che rileva l'avvicinamento di persone o oggetti e quindi il blocco totale del sistema. Pertanto, per maggiore sicurezza e volendo evitare di installare ulteriori sensori si opta per un sistema che non permette il movimento simultaneo dei due robot. (Si veda a tal proposito la figura 3.5)

- Se il braccio del robot TM è al di fuori dell'impronta dello LD mentre esso sta ruotando, il TM potrebbe scontrarsi con forza elevata contro oggetti vicini. Anche se il raggio dello LD è aumentato nella sua configurazione, un oggetto potrebbe passare inosservato dietro lo LD prima di una grande rotazione. Per evitare questo, è meglio che il TM rimanga il più possibile all'interno dell'impronta dello LD.

- Se i pulsanti di E-stop non sono unificati, allora è molto probabile che qualcuno prema un E-stop per un robot mentre l'intenzione era fermare un altro robot. In tal caso, il robot che voleva fermare urgentemente non si fermerebbe, causando potenzialmente gravi danni.

Pertanto, tutti i pulsanti di arresto di emergenza, quando vengono premuti, dovrebbero provocare l'arresto di emergenza dell'intero sistema.

- Se è possibile per un utente o un operatore entrare nell'area di lavoro del TM mentre è in movimento, allora il TM può essere configurato in modo che non possa causare danni limitando adeguatamente le sue velocità e forze. Inoltre, tutti gli utenti e gli operatori che interagiscono con il robot TM dovrebbero conoscere il sistema ed essere consapevoli di ogni possibile pericolo.

Per quando riguarda il primo punto questo può essere attuato con l'uso di un interruttore di sicurezza senza contatto. Inoltre, per tenere conto di eventuali scuotimenti che possono verificarsi durante il movimento LD, è auspicabile che l'interruttore rimanga chiuso in un intervallo di almeno 10 mm tra i due lati dell'interruttore. Un lato dell'interruttore è montato vicino alla flangia del TM e l'altro lato è montato in una posizione fissa sulla piattaforma di montaggio. Quando il punto centrale dell'utensile del robot TM (TCP) non si trova in posizione di homing, il PLC arresta lo LD. In questo modo, se il robot TM è esteso, il robot LD non sarà in grado di muoversi. Questo è dimostrato nella figura 3.5. Inoltre, se per qualsiasi motivo il robot TM non fosse acceso, lo LD non sarebbe comunque in grado di muoversi quando il TM fosse in una posizione non sicura. Inoltre, se il TM cerca di muoversi mentre il LD è già in movimento, allora lo LD andrà immediatamente in E-stop. Con la soluzione dell'interruttore senza contatto, il TM rimarrà all'interno dell'impronta del LD solo se la sua posizione di homing è programmata come tale. Tuttavia, i laser laterali sul LD possono essere usati per aiutare a garantire che lo LD non si muova se la TM si estende oltre i lati.

Per attuare l'arresto totale del sistema in condizioni di emergenza se si utilizza l'arresto di emergenza incorporato nell'HMI dello LD, questo dovrebbe essere rimosso o reindirizzato al PLC di sicurezza in modo che possa agire come un E-stop di sistema. Inoltre lo stick remoto del controller TM ha un arresto di emergenza che ferma solo il robot TM e non vi è alcuna uscita dal controller TM che indica che il TM è in uno stato di arresto di emergenza. Un operatore vicino o altri intorno potrebbero essere in pericolo se qualcuno cerca erroneamente di arrestare lo LD premendo E-stop dello stick remoto del TM. Lo stato del pulsante di E-stop dello stick del TM non può essere monitorato elettricamente, quindi per utilizzare efficacemente questo E-stop come E-stop di sistema, si dovrebbe impedire l'accesso allo stick remoto TM a meno che lo LD non sia già in uno stato di E-stop. Un modo per farlo è un altro interruttore di sicurezza senza contatto sulla porta di un piccolo vano che contiene questo stick remoto TM. Ciò è riportato nella figura sottostante

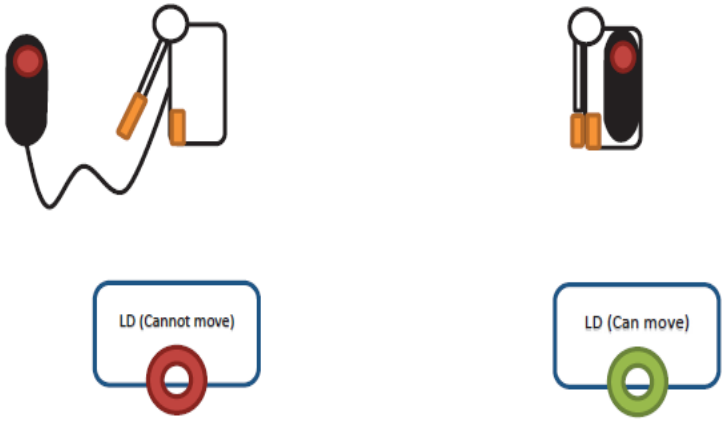


Figura 4.1: Interruttore di sicurezza in cui l'AMR può muoversi e non muoversi

Quando questa porta si apre, lo LD diventa E-stopped. Pertanto, se l'utente dovesse premere E-stop sulla levetta del telecomando TM l'intero sistema si troverebbe in uno stato di arresto di emergenza anche se l'arresto di emergenza dello LD è causato da una fonte diversa da dal pulsante E-stop dello stick remoto. Quando questo interruttore della porta diventa chiuso, lo LD non si riattiverà automaticamente e richiederà all'utente di abilitare manualmente i motori premendo il pulsante LD on o un comando nel software. Si noti che è compito dell'utente assicurarsi che l'E-stop non sia premuto mentre lo stick remoto è all'interno dell'involucro. E' possibile evitare ciò progettando l'involucro in modo da essere in grado di inserire lo stick solo se l'E-stop non è premuto.

4.2 Alimentazione

Questa sezione discuterà le considerazioni per la progettazione del sistema di alimentazione, come ad esempio come dividere la potenza, la durata della batteria stima, e la gestione della sequenza di accensione.

La tensione della batteria LD varia da 22VDC a 30VDC a seconda del suo attuale stato di carica. Pertanto, un convertitore DC-DC dovrebbe essere usato per assicurare che certi componenti ricevano quella tensione continua costante. Per esempio, alcuni dispositivi HMI e unità PLC richiedono esattamente 24VDC in ingresso, quindi non sarebbe adatto ad alimentarli direttamente dalla batteria.

Può essere auspicabile avere un unico pulsante di accensione per l'intero sistema invece di accendere lo LD e il TM separatamente. Per ottenere questo, un relè può essere usato per cortocircuitare i due ingressi 'On/Off remoto' sul controller TM. Aprire e chiudere questi due ingressi ha lo stesso effetto della pressione del pulsante di accensione sullo stick remoto. Questo potrebbe essere controllato da un PLC o direttamente dall'IO digitale dell'LD.

4.2.1 Durata della batteria

Per riferimento, un prototipo di questo sistema combinato di robot LD e TM5M ha avuto un tempo di esecuzione di 8,5 ore. Questo prototipo ha eseguito i movimenti di un'operazione di pick and place a velocità tipiche. Il ciclo è stato suddiviso in tre segmenti: 24 secondi di movimento LD, 8 secondi di movimento del braccio TM e 4 secondi di inattività.

Un altro test ha dato come durata della batteria di 7.5 ore effettuando un ciclo di 47 sec di movimento LD a velocità standard e 43 sec di movimento TM12 facendo pick and place con un carico di 4.2 Kg a velocità ridotte al 40% rispetto al massimo

Vale la pena notare che il consumo di energia del TM può essere ridotto del 5-10% se la sua tensione di alimentazione in ingresso è 60VDC invece di 24VDC. Questa tabella mostra l'analisi della potenza di ciò che può essere trovato tipico nel sistema. L'importante considerazione per l'analisi della potenza è che il consumo totale di energia non dovrebbe superare i 30A per evitare che la batteria LD si spenga. Come nota aggiuntiva, non c'è una differenza significativa nella potenza consumata tra i diversi modelli di bracci robotici TM. L'utilità di un sistema robotico dipende dalla percentuale di tempo in cui è utile ovvero il rapporto tra tempo di utilizzo e tempo di utilizzo+ricarica. L'equazione seguente può essere usata per stimare la 'percentuale di uptime'. L'utente dovrebbe scegliere i valori di queste variabili in base all'applicazione di destinazione. Questa stima non prende in considerazione la manutenzione o il tempo di viaggio da e verso il luogo di ricarica. Assegnare valori alle seguenti variabili. Tutte le variabili che rappresentano la potenza possono essere in qualsiasi unità, come wattora (wH) o ampere ore (Ah), purché sia coerente per tutte le variabili.

- C = tasso di carica della batteria
- Ls = consumo medio approssimativo di potenza LD quando non è in movimento
- Lm = consumo medio approssimativo di energia LD durante il movimento tipico
- Ts = consumo medio approssimativo di energia della TM quando non è in movimento
- Tm = consumo medio approssimativo di energia della TM durante il movimento tipico
- M = percentuale di tempo speso a muovere lo LD contro lo spostamento del TM (supponendo che si muova uno alla volta)
- U = percentuale del tempo trascorso in funzione rispetto al tempo trascorso in carica (%)

Usando le definizioni delle variabili di cui sopra, la durata che il sistema può operare da piena carica a vuoto può essere modellato dalla seguente equazione.

$$\frac{C}{C + (L_m + T_s)M + (L_s + T_m)(1 - M)} = U \tag{4.1}$$

La capacità della batteria non ha un impatto significativo sull'utilità del sistema. Invece, è molto più importante considerare i tassi di consumo energetico e il tasso di ricarica per ottenere la massima utilità dal sistema. Per questo motivo, può essere vantaggioso progettare un'applicazione

che utilizzi una batteria aggiuntiva esterna esclusivamente per il TM e sviluppare un sistema di ricarica per la batteria esterna separato da quello della batteria del LD.

Per quanto riguarda le correnti di spunto la batteria del LD riesce a superarle senza problemi e senza danni, tuttavia si consiglia di non fare avvenire l'accensione del LD e del Tm in contemporanea ma con un minimo di ritardo in modo tale da non soprapporre le due correnti di spunto.

Al massimo carico utile, alla massima velocità e con un'alimentazione a 24V, il TM assorbirà una corrente di picco di circa 20-25A e una corrente media di 12-16A. Pertanto, il calibro (AWG) del filo utilizzato per alimentare il TM dovrebbe ospitare almeno questa quantità di corrente. Il nucleo LD può emettere al massimo 10A, ma alla massima velocità e carico utile, il TM può assorbire una potenza media superiore a 10A, quindi occorre alimentare il TM direttamente dalla batteria. Tuttavia, se la velocità è limitata, è possibile alimentare il TM direttamente dal core del LD.

4.3 Meccanica

In questa sezione ci si limita ad effettuare un breve elenco di tutte le problematiche da tenere in considerazione lato meccanica, molte di esse già sono state illustrate nei capitoli precedenti e verranno poi ulteriormente approfondite e risolte nei capitoli successivi.
Si rimanda quindi ai capitoli dedicati per maggiori approfondimenti.

- Assicurarsi che il centro di gravità (COG) del robot TM in posizione di riposo sia entro le raccomandazioni prescritte nella guida utente del LD
- Regolare i valori massimi di velocità e accelerazione sia del LD che del TM a seconda della posizione del COG del TM
- Assicurarsi che l'inerzia dovuta ai motori TM non ribalti il robot LD in tutte le possibili configurazioni del TM
- Analizzare la necessità di utilizzare un meccanismo di supporto esterno per evitare il ribaltamento dei robot
- Incorporare un laser di sicurezza aggiuntivo ad un'altezza diversa per garantire la sicurezza mentre il TM è in movimento
- Fare tutte le modifiche di configurazione necessarie e aggiungere laser laterali extra se il sistema combinato di robot è più grande dell'ingombro della base LD

Uno dei principali aspetti da considerare durante la progettazione del sistema combinato è la posizione del centro di gravità (COG). L'analisi del centro di gravità dovrebbe essere fatta in due parti, quando il TM è fermo e LD è in movimento e quando il LD è fermo e il TM è in movimento. Nei capitoli successivi si discuterà di queste due analisi.

L'ipotesi della necessità di un meccanismo esterno potrebbe essere falsa se si movimentano carichi molto leggeri a bassa velocità, tuttavia nel caso di Joytek si è deciso di prendere in considerazione carichi massimi alle massime velocità e accelerazioni, per rispondere al meglio a ogni possibile utilizzo che poi ne andrà a fare il cliente finale.

Capitolo 5

Serie AMR Omron: LD90

5.1 AMR Omron

Omron è un'azienda giapponese, attiva nel settore dei componenti per l'automazione industriale, nei prodotti elettromedicali e nei componenti per l'elettronica. Oggi fattura più di 5,5 miliardi e conta più di 35.000 dipendenti in 36 nazioni che operano per fornire prodotti e servizi ai clienti in una varietà di settori, inclusi l'automazione industriale, le industrie dei componenti elettronici e la cura della salute. L'azienda ha uffici centrali in Giappone (Kyoto), Asia Pacifico (Singapore), Cina (Hong Kong), Europa (Amsterdam) e USA (Chicago) [14]. L'organizzazione europea dispone di sedi di ricerca e sviluppo, impianti di produzione e fornisce l'assistenza ai clienti di tutte le nazioni europee. L'azienda è una dei principali fornitori di prodotti nell'ambito dell'automazione industriale. Attualmente ha 4 divisioni che sono:

- **OMRON Healthcare**, leader nella fornitura di apparecchi medicali per uso terapeutico e per il monitoraggio.
- **OMRON Industrial Automation**, è uno dei principali produttori di componenti e sistemi tecnologicamente all'avanguardia per l'automazione industriale, nonché fornitore di servizi di consulenza per ogni tipo di applicazione.
- **OMRON Inspection Systems**, fornisce una serie di strumenti validi per il controllo e la misurazione in ambito industriale.
- **OMRON Eletronic components**, fornisce prodotti e componenti elettronici di vario tipo.

Nell'ambito industrial automation Omron ha sviluppato diverse linee di robot, dagli articolati, agli scara, ai delta, infine una linea di robot collaborativi e mobili.

Nel 2017 l'azienda ha lanciato sul mercato la prima serie di robot mobili a guida autonoma: la serie LD. Sono robot AMR e per le loro caratteristiche e vantaggi e eventuali utilizzi si rimanda alla sezione 2.4. Con l'introduzione di questa tecnologia nella sua offerta di prodotti Omron ha voluto fare un altro passo in avanti verso la realizzazione di una piattaforma tecnologica completa per la 'governance' della fabbrica in un'ottica di Industry 4.0. La fabbrica 4.0 deve infatti essere 'intelligente', 'interattiva' e 'integrata' e Omron con questo prodotto intende offrire una soluzione che vada verso il soddisfacimento di tali bisogni.

La famiglia OMRON di robot mobili è in grado di trasportare in modo sicuro ed efficiente un'ampia gamma di carichi utili, da 60 kg a 1500 kg, e di sostituire in tal modo i carrelli elevatori o carrelli manuali spostasti da uomini.

I robot mobili autonomi di OMRON sono progettati per migliorare in maniera significativa la produttività nelle attività di produzione e logistica. Consentono di eliminare gli errori e migliorare la tracciabilità dei materiali, oltre a permettere agli operatori di concentrarsi sulle attività più complesse. Inoltre, a differenza degli AGV tradizionali, tali robot mobili si spostano sfruttando le caratteristiche esistenti dell'ambiente, senza richiedere onerose modifiche. Questi AMR possono essere impiegati rapidamente in applicazioni di magazzino indipendenti, nonché integrate in un concetto di automazione totale che combina movimento, sicurezza, visione, controllo e robotica: una soluzione completa da un unico fornitore.

Attualmente la serie LD Omron prevede tre modelli che si contraddistinguono per il loro peso massimo trasportabile:

- **LD60/90**
  capacita di carico:60/90 Kg, velocità: 1.2/1.8 m/s
- **LD250**
  capacita di carico:250 Kg, velocità: 1.2 m/s
- **HD1500**
  capacita di carico:1500 Kg, velocità: 1.8 m/s

La serie 250 e 1500 sono robot progettati per lavorare in ambienti industriali gravosi con carichi pesanti, hanno rivestimenti in metallo che gli permettono di resistere meglio a attività impegnative. LA serie 60/90 invece è concepita per la movimentazione dinamica di materiali in ambienti difficili, inclusi corridoi stretti e posizioni dinamiche, con la presenza di persone.

Figura 5.1: Serie di AMR Omron. Da destra a sinistra: HD1500, LD250, LD90

Come già anticipato nella sezione 3.2 per lo sviluppo dell'applicazione richiesta in Joytek si è deciso di usare un LD90 poiché era già presente in azienda.
Ora si vedranno e esamineranno le caratteristiche di questo prodotto Omron.

5.2 Caratteristiche LD90

LD90 è un AMR sviluppato da Omron di piccole dimensioni e in grado di trasportare fino a 90 Kg. É stato appositamente concepito per lavorare anche in spazi stretti e altamente dinamici.

Nella figura sottostante si riporta le dimensioni di massima di questo robot mobile dal peso di 62 Kg inclusi batteria.

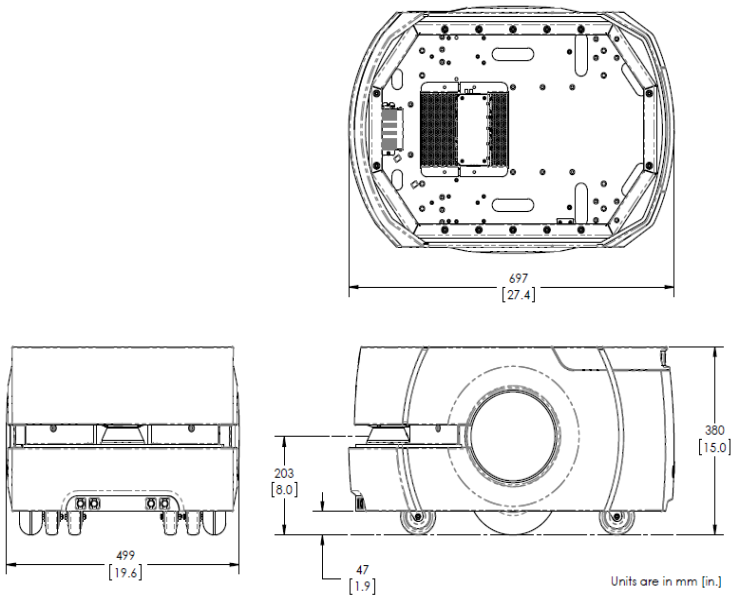


Figura 5.2: Ingombri di massima LD90

Può lavorare a una temperatura che va dai 5° ai 40° con umidità fino al 95%, è classificato IP40 e lavora con pavimenti aventi una flatness del Ff25 (indice di normativa della "American Concrete Institute"), può superare scalini al massimo di 10 mm e gap di 15 mm

Di fondamentale importanza sono le massime velocità imprimibili che vengono riportate nella figura sottostante:

Parameter	Default	Min	Max
AbsoluteMaxTransVel (LD-60)	1800	1	2500
AbsoluteMaxTransVel (LD-90)	1300	1	2500
AbsoluteMaxTransNegVel	-250	-2500	-1
AbsoluteMaxTransAccel	500	1	2000
AbsoluteMaxTransDecel	500	1	2000
AbsoluteMaxRotVel	100	1	180

Figura 5.3: Velocità e accelerazioni imprimibili

A ciò va aggiunta una accelerazione e decelerazione rotazionale massima di 360 deg/s^2 ma impostate a default di 180.

Tali parametri sono da tenere in considerazione e andranno verificati e eventualmente abbassati se il centro di massa del carico trasportato sopra LD non rientrerà nello spazio designato da Omron nella sua guida. Se il centro di massa ricade entro tali spazi, che ovviamente variano a seconda del peso trasportato, si possono usare quei valori di default o anche più.

Si riportano nelle sottostanti figure i volumi entro cui deve ricadere il CG che sono evidenziati ci celeste.

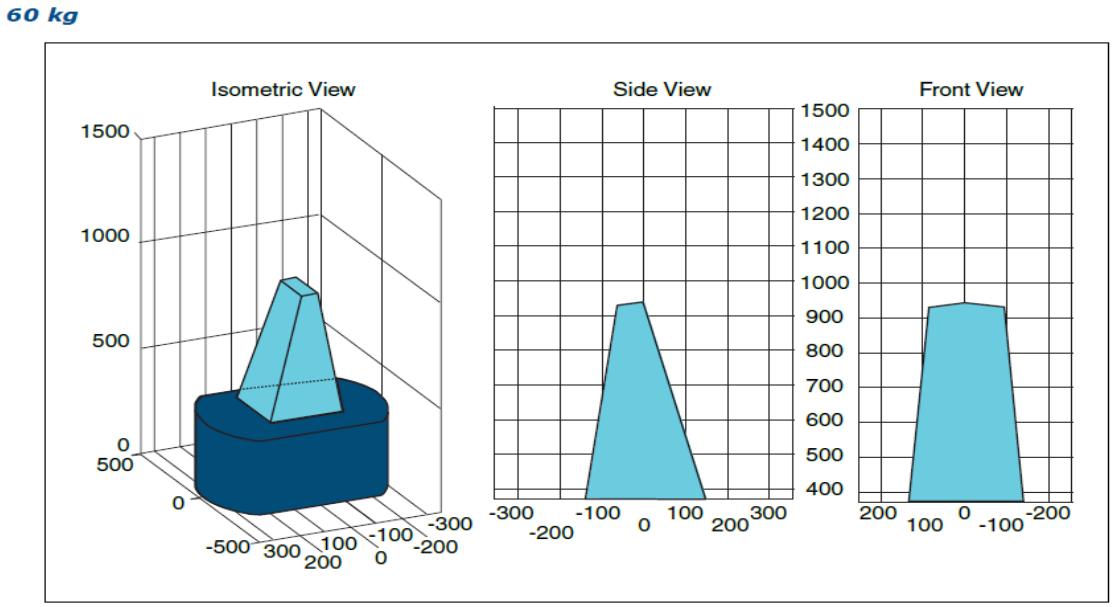


Figura 5.4: Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 60 Kg

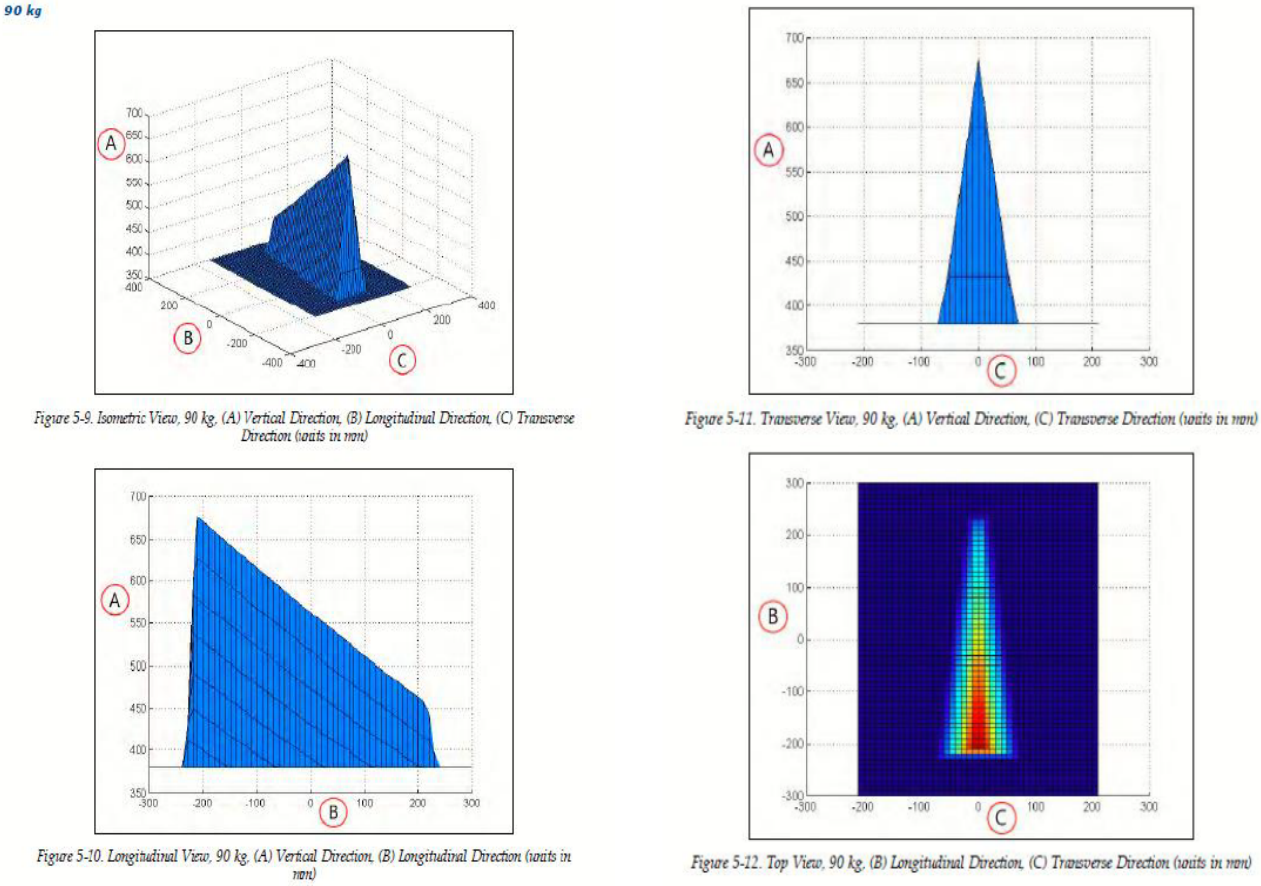


Figure 5-9. Isometric View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (B) Longitudinal Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figure 5-11. Transverse View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figure 5-10. Longitudinal View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (B) Longitudinal Direction (units in mm)

Figure 5-12. Top View, 90 kg. (B) Longitudinal Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figura 5.5: Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 90 Kg

Ovviamente si deve fare in modo che il baricentro sia il più basso possibile, sulla linea di mezzeria e spostato leggermente indietro, in corrispondenza del baricentro dell'AMR, è questa la parte di volume consentito da prediligere. Ciò ovviamente garantisce maggiore stabilita durante il movimento e consente una maggiore accelerazione e decelerazione.

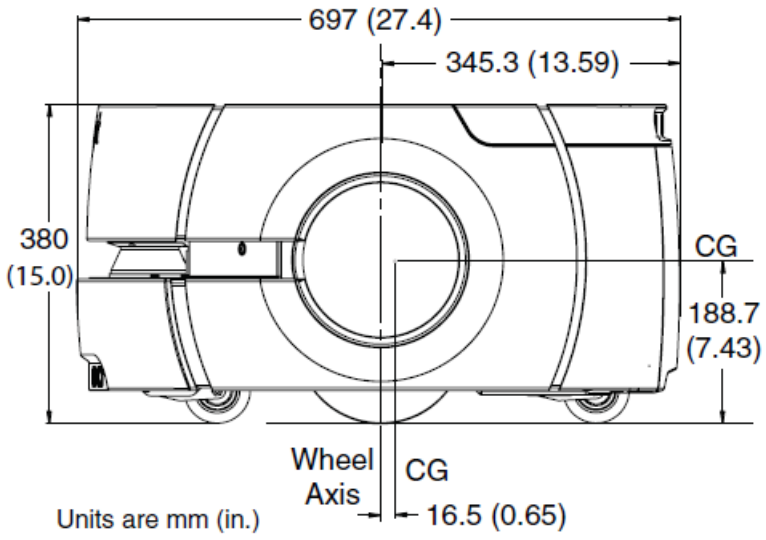


Figura 5.6: Baricentro dello LD90 senza carico

Per quanto riguarda la batteria essa ha le seguente caratteristiche:

- output 22-30VDC
- 72Ah
- runtime 15h senza carichi
- charge time: 4h, 2000 cicli di ricarica

Per quanto riguarda gli output di alimentazione della batteria che sono presenti nel LDcore si ha:

Nominal	Qty	Actual	Maximum Current	Description
5 VDC	1	5 VDC ±5%	1 A	Switched Aux power
12 VDC	1	12 VDC ±5%	1 A	Switched Aux power
20 VDC	1	20 VDC ±5%	1 A	Switched Aux power
22 - 30 VDC	2	battery	4 A	Switched
22 - 30 VDC	1*	battery	10 A	Switched
22 - 30 VDC	1*	battery	10 A	Safe, Switched
* 10 A Switched and 10 A Safe, Switched share the 10 A of current.				

Figura 5.7: Battery output

Per alimentare il TM come si è già detto si preleva energia direttamente dalla batteria non da questi output presenti nel core poiché sarebbe insufficiente l'amperaggio.

In ultimo si riporta tramite un'immagine la sensoristica di cui è dotato questo AMR per fare si che sia in grado di muoversi autonomamente e in condizioni di sicurezza.

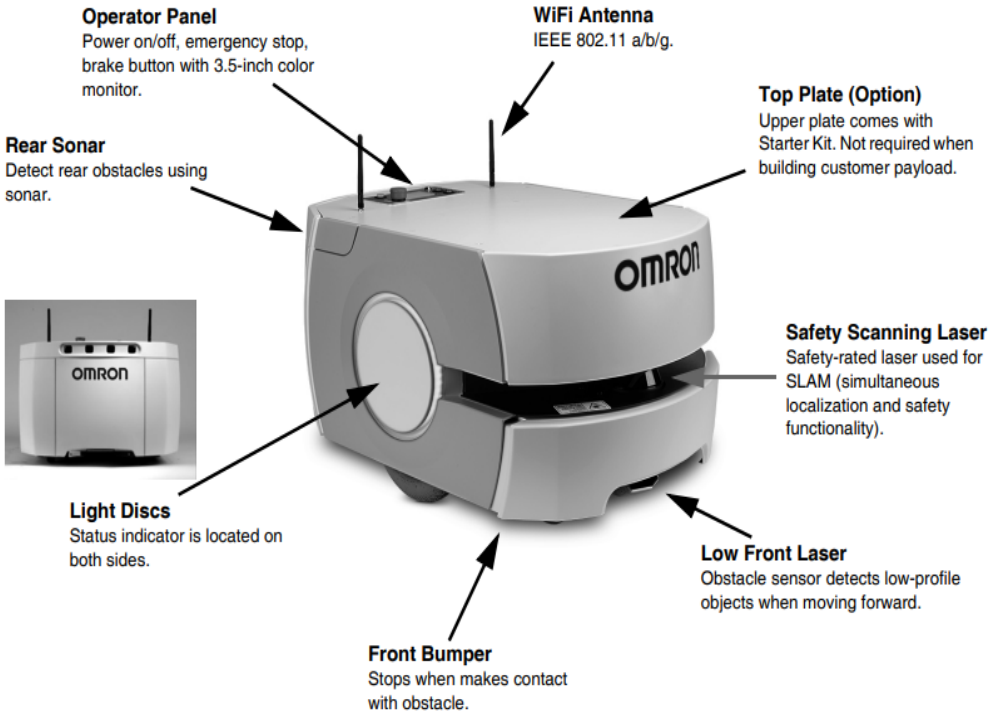


Figura 5.8: LD90 con illustrato tutti i suoi componenti

Un fattore fondamentale da tenere in considerazione è che ogni eventuale struttura aggiuntiva costruita sopra LD per trasportare la merce non deve poi interferire con i fasci laser e i rear sonar altrimenti poi il sistema non funzionerebbe.

Il laser di navigazione a bordo è un sensore di scansione molto preciso. Il laser fornisce 500 letture in un campo visivo di 250 gradi, con una portata massima tipica di 15 m . Il laser opera in un unico piano, posizionato a 203 mm dal pavimento. Nella maggior parte degli ambienti, il sensore fornirà dati altamente accurati. Vetro, specchi e altri oggetti altamente riflettenti non possono essere rilevati in modo affidabile dal laser per cui si deve prestare massima attenzione quando si utilizza la piattaforma in aree con questi tipi di oggetti. Se la piattaforma dovrà guidare in prossimità di questi oggetti, si consiglia di utilizzare una combinazione di marcature sugli oggetti, come nastro adesivo o strisce dipinte, e di utilizzare anche settori vietati nella nella mappa, in modo che la piattaforma sappia pianificare percorsi sicuri intorno a questi oggetti.

Ogni coppia di sonar è composta da un emettitore e un ricevitore. Gli emettitori e i ricevitori

del sonar sono fisicamente identici, ma la piattaforma li usa in modo diverso. La portata è fino a 5 m , anche se la gamma accurata tipica è solo circa 2 m. Le due coppie di sonar posteriori della piattaforma sono per il rilevamento degli ostacoli durante la retromarcia. Le uniche due volte che la piattaforma farà marcia indietro è quando si aggancia alla docking station, o quando il paraurti ha colpito un ostacolo. In quest'ultimo caso, la piattaforma arretra quanto basta affinché possa ruotare senza toccare l'ostacolo.

Ogni ruota ha un encoder che dice al sistema di navigazione quanto la ruota ha girato e in quale direzione. Ogni ruota ha anche un sensore Hall. Il nucleo ha un giroscopio montato su di esso, per tracciare la rotazione della piattaforma. La combinazione di rotazione e distanza percorsa viene utilizzata dalla piattaforma per supportare il laser di navigazione durante la localizzazione. Un paraurti, con un laser a basso rilevamento, è montato nella parte anteriore della piattaforma, nel caso in cui i sistemi di prevenzione degli ostacoli non riescano a rilevare un ostacolo.

Omron fornisce in maniera opzionale il Top Plate (una piastra che fa da base di appoggio per il carico), altrimenti si può usare qualsiasi altra struttura creata ad hoc dal cliente finale per trasportare al meglio ciò che si vuole fissandola su degli appositi fori filettati posti sulla parte superiore del telaio.

Tutte le informazioni riportate in questa sezione sono disponibili sui manuali utenti Omron dello LD90 [15].

Capitolo 6

Cobot TM5 e TM12 Omron: caratteristiche

6.1 Cobot Omron

A dicembre 2018 l'azienda Omron ha deciso di lanciare la sua prima serie di robot collaborativi facendo una cooperazione con l'azienda Tech-Man. Da questa unione è nata una linea di cobot denominata TM.
Sono stati prodotti diversi modelli che differiscono per il peso che possono reggere e la distanza raggiunta. Per ogni serie viene fatto il modello in corrente alternata o continua

Regular playload

- **TM5-700** può raggiungere una distanza di 700 mm e sopportare un carico utile di 6 kg, adatto per applicazioni ravvicinate che non richiedono carichi elevati.
- **TM5-900** può raggiungere una distanza di 900 mm e sopportare un carico utile di 4 kg, adatto per applicazioni relativamente vicine con carichi molto bassi.

Medium-Heavy payload series

- **TM12** può raggiungere una distanza di 1300 mm e sopportare un carico utile di 12 kg, adatto per applicazioni che necessitano di un ampio spazio di lavoro e carichi relativamente elevati.
- **TM14** può raggiungere una distanza di 1100 mm e sopportare un carico utile di 14 kg, a differenza del TM12 può raggiungere distanze minori ma sopporta carichi più elevati

Questi robot sono leggeri, facili da trasportare e installare, possono lavorare in interazione con l'uomo e sono dotati di un sistema di visione artificiale tramite una fotocamera 2D da 5 megapixel a colori. La telecamera è in grado di localizzare gli oggetti in un ampio campo visivo e la luce di miglioramento dell'immagine consente il riconoscimento degli oggetti in quasi tutte le condizioni. Inoltre include funzioni come la corrispondenza dei modelli, la lettura dei codici a barre e la classificazione dei colori che consentono l'ispezione, le misurazioni e l'ordinamento. Rispecchiano di fatto tutte le caratteristiche di un collaborativo. Possono svolgere le più svariate configurazioni aiutando l'uomo durante il ciclo produttivo o addirittura sostituendolo. Sulla sua flangia del polso è possibile montare qualsiasi utensile. La sua programmazione è facile e intuitiva e ciò permette una rapida ricollocazione all'interno dell'azienda e intercambiabilità dei ruoli.

Sono robot antropomorfi che simulano un braccio umano; sono in grado di posizionare l'oggetto che hanno alla loro estremità in qualsiasi punto dello spazio all'interno del proprio workspace e con qualsiasi orientamento. Si può per tanto definire a proprio piacimento tutti e sei i gradi di libertà di cui dispone qualsiasi corpo rigido nello spazio, ovvero:

- Posizione: coordinate xyz.
- Orientamento: angoli $\alpha\beta\gamma$.

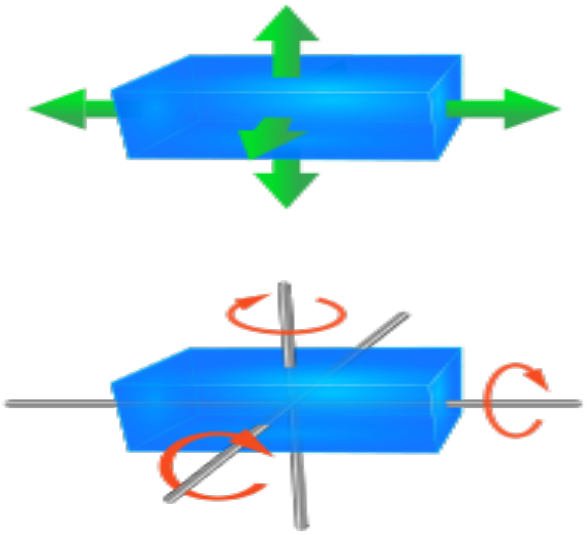


Figura 6.1: I 6 gradi di libertà di cui dispone un corpo rigido

Ciò è possibile grazie a 6 giunti rotativi di cui è composto. I primi tre vanno a comporre l'articolazione del braccio e permettono la posizione dell'oggetto nello spazio, mentre gli ultimi tre vanno a formare il polso e permettono quindi di cambiare l'orientamento dell'oggetto andando ad aggiungere altri tre gradi di libertà.

6.2 Specifiche TM5 e TM12

Come gia detto in questa prima fase si valuta l'interazione di un LD90 sia con un TM5 sia con un TM12, pertanto in questa sezione si andranno a riportare le caratteristiche di entrambi i cobot [16] [17]. Essi sono identici tranne ovviamente le dimensioni, pesi e velocità e accelerazioni che sono imprimibili.

6.2.1 TM5-900

Il TM5-900 ha un peso di 22.6 Kg mentre il controller pesa per la versione a DC 14.6 Kg. Come già detto è in grado di spostare al massimo 4 Kg e di raggiungere un'estensione di 900 mm. La velocità tipica dell'end-effector è di 1.4 m/s.

Si riportano nella tabella sottostante i valori di movimentazione dei giunti e le loro velocità:

Tabella 6.1: Valori di range movimento e velocità per ogni giunto TM5-900

Giunto	Joint range [deg]	Joint speed [deg/s]
1	±270	180
2	±180	180
3	±155	180
4	±180	225
5	±180	225
6	±270	225

Il TM5-900 ha una ripetibilità di $\pm 0.05mm$.
Si riporta la figura che indica le dimensioni dei suoi componenti, sarà fondamentale poi per calcolare i parametri da inserire nelle matrici di Denavit **??**.

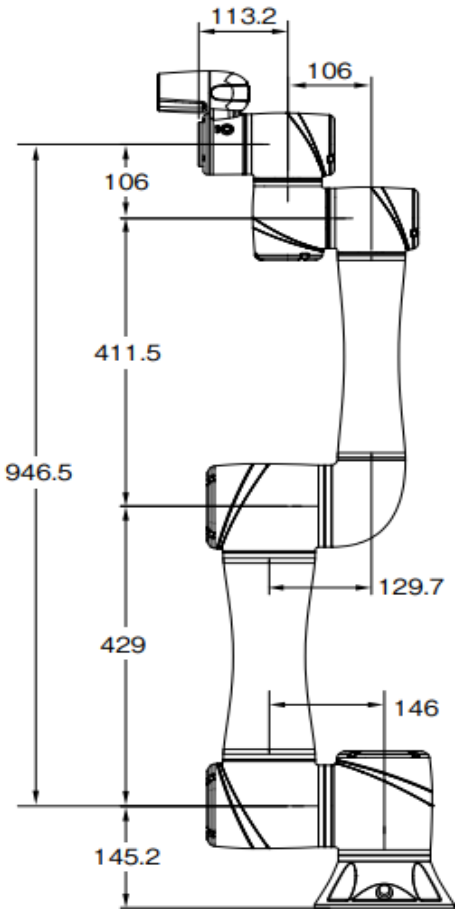


Figura 6.2: Dimensioni TM5-900

Si riporta anche un grafico di fondamentale importanza poiché indica la massima distanza del baricentro del carico dalla flangia dell'end-effector espressa in mm in funzione dei Kg del carico. Come si nota man a mano che i Kg diminuiscono la distanza può aumentare.

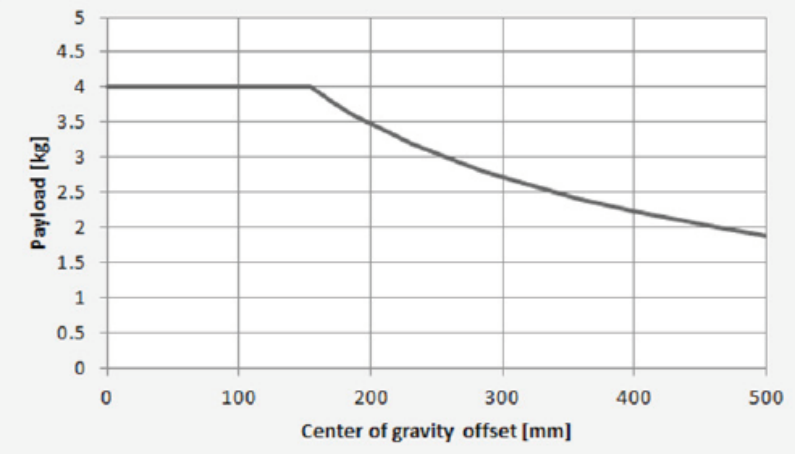


Figura 6.3: Grafico distanza flangia/baricentro in funzione dei Kg

Tale grafico è di fondamentale importanza per poi calcolare il baricentro totale del robot con il suo carico come si vedrà nel capitolo 8 Si prenderà come distanza quella più sfavorevole di 160 mm dalla flangia con un peso di 4 Kg per calcolare il baricentro del sistema robot+carico al variare degli angoli di giunto.

6.2.2 TM12

Per il TM12 si riportano brevemente le stesse caratteristiche del TM5 già elencate.

- Peso:33.3 Kg
- Massima distanza raggiungibile: 1300 mm
- Carico sollevabile: 12 Kg
- Velocità tipica: 1.3 m/s
- Peso controller: 14.5 Kg per versione DC
- Ripetibilità: $\pm 0.1mm$

Tabella 6.2: Valori di range movimento e velocità per ogni giunto TM12

Giunto	Joint range [deg]	Joint speed [deg/s]
1	±270	120
2	±180	120
3	±166	180
4	±180	180
5	±180	180
6	±270	180

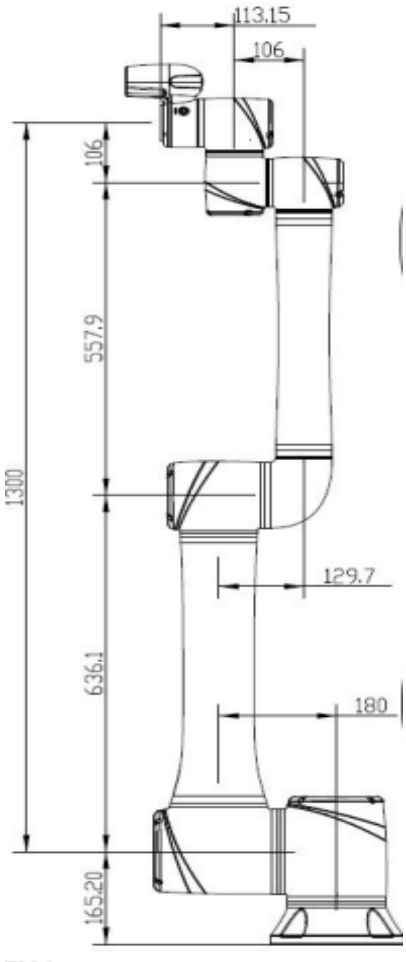


Figura 6.4: Dimensioni TM12

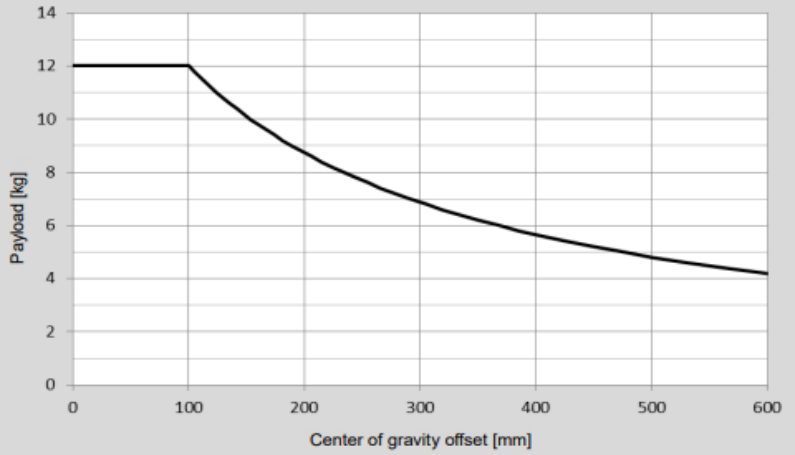


Figura 6.5: Grafico distanza flangia/baricentro in funzione dei Kg per TM12

6.3 Risoluzione cinematica diretta TM5 e TM12

Il più grande problema come si è già detto per questo tipo di applicazione è quello di garantire la stabilità del sistema per ogni configurazione che il cobot assume sopra l'AMR e di garantirla anche pur quando il cobot solleva il suo massimo peso possibile ovvero 12 Kg. Per avere un'idea se un sistema del genere fosse stabile, e se non lo fosse, di quanto fosse necessario allargare l'impronta dell'AMR, si è studiato la posizione del baricentro di tutto il sistema al variare di tutti i possibili angoli di giunto che possono essere assegnati al cobot. Ciò permette di capire la stabilità da un punto di vista statico ma ovviamente non basta in quanto poi si deve considerare anche il lato dinamico e delle inerzie che sono in gioco e vedere se c'è stabilità anche mentre il cobot si muove.

Procedendo per step si è prima fatta un'analisi statica di tutto il sistema: AMR+cobot+controller +piastra dell'AMR, e poi successivamente un'analisi dinamica. Per fare ciò è necessario risolvere la cinematica diretta del robot in modo che si può sapere dove cade il baricentro del TM per ogni configurazione degli angoli di giunto e quindi di conseguenza calcolare il baricentro totale del sistema.

Per i riferimenti teorici sulla cinematica diretta di un robot a 6 gradi di libertà e per il metodo adottato per effettuare lo studio fare riferimento al capitolo sulla teoria della cinematica

Capitolo 7

Riferimenti teorici sulla cinematica di un robot antropomorfo

In questo capitolo si andranno a costruire i riferimenti e le basi teoriche [18] che poi saranno utilizzate nei successivi capitoli di questo lavoro. Nel particolare si andrà a trattare in cosa consiste risolvere la cinematica diretta e inversa di un robot e come è possibile fare le trasformazioni di coordinate quando ci si muove da un giunto all'altro. Si introduce quindi la matrice di trasformazione e il modello cinematico più largamente diffuso a livello internazionale ovvero quello di Denavit-Hartemberg.

7.1 Trasformazioni di coordinate

Ogni punto può essere localizzato nello spazio grazie al suo vettore posizione che parte dall'origine del sistema di riferimento e arriva al punto,quindi da tre componenti scalari. Questo vettore ovviamente dipende da dove è collocata l'origine del sistema. Infatti lo stesso punto **"P"** può avere un vettore posizione se riferito alla terna "A" o un altro totalmente diverso se riferito a una terna B. Le due terne "A" e "B" possono differire o per una traslazione rigida dell'origine, o per una rotazione o per una rototraslazione. È importante saper descrivere la posizione e di un corpo nello spazio in vari sistemi di riferimento differenti, a partire dall'informazione della loro localizzazione relativa. Si noti che le entità coinvolte (il punto ed il vettore posizione) non cambiano, ma l'applicazione di una trasformazione di coordinate ne fornisce semplicemente una descrizione in un SR diverso.

Nella robotica questo aspetto è fondamentale; di fatto si conosce sempre quanto dista l'oggetto che si sta prendendo dall'end-effector del robot in quanto è costante, ma non sappiamo la posizione assoluta dell'end-effector riferita alla terna base in quanto il movimento del robot comporta una continua traslazione e rotazione tra la terna fissa alla base e quella del terminale.

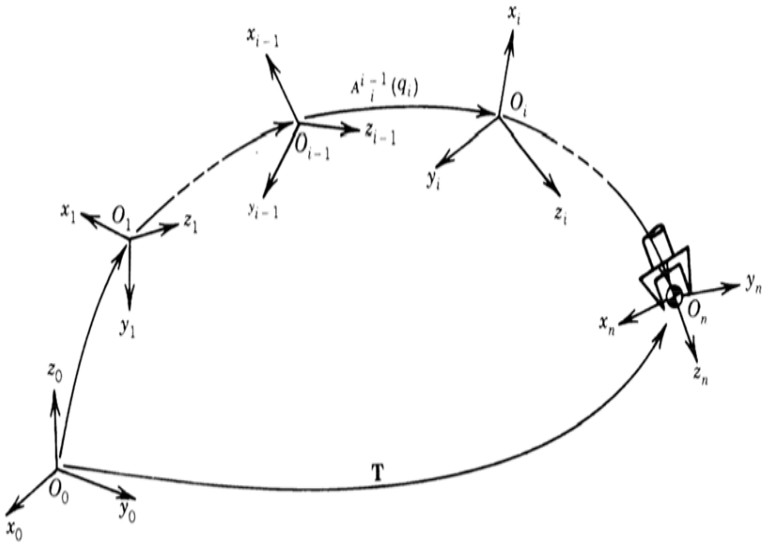


Figura 7.1: Sistema di rototraslazione di un robot seriale

Per fare questo è necessario essere in grado di risolvere la catena cinematica che porta dalla terna fissa all'ultima terna. Successivamente in tal modo si potrà sapere la posizione del terminale e il suo orientamento rispetto alla base. Si faccia riferimento alla figura 7.1. Tale procedimento è possibile grazie alla trasformazione di coordinate tra una terna e l'altra. Ciò permette di sapere la posizione di un punto rispetto a una terna "A" conoscendo la posizione reciproca delle due terne e la posizione del punto nella terna "B".

In un robot seriale secondo la normativa vengono definite diverse tipologie di terne standardizzate e normate per permettere all'operatore di lavorare al meglio sulla sua programmazione.

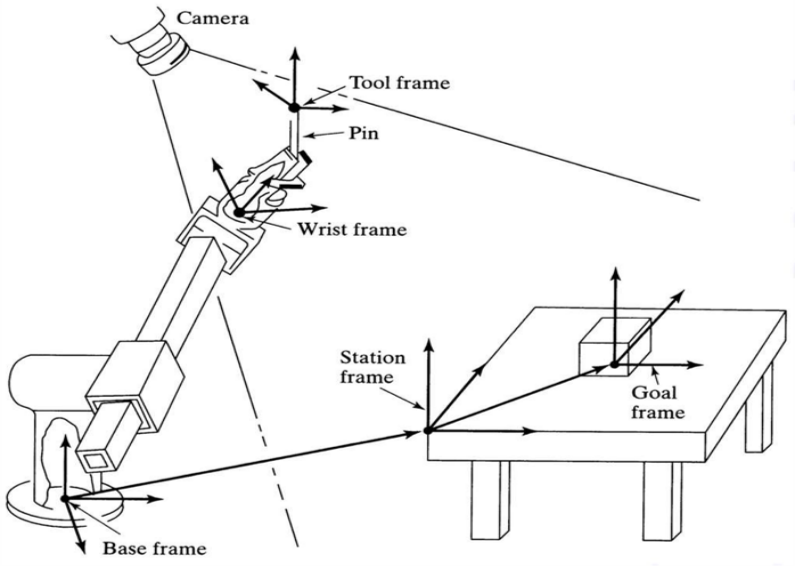


Figura 7.2: Le diverse terne che possono essere definite in uno spazio di lavoro

Si analizza ora singolarmente il caso della traslazione rigida e della rotazione e successivamente verrà affrontato il caso più generico della rototraslazione.

7.1.1 Traslazione rigida

Se le terne A e B sono puramente traslate e ${}^B_AP$ descrive la posizione dell'origine di B relativamente ad A, allora la posizione di un generico punto P rispetto ad A può essere calcolata a partire dalla sua espressione in B tramite la seguente formula:

$$ {}^AP = {}^BP + {}^B_AP \tag{7.1}$$

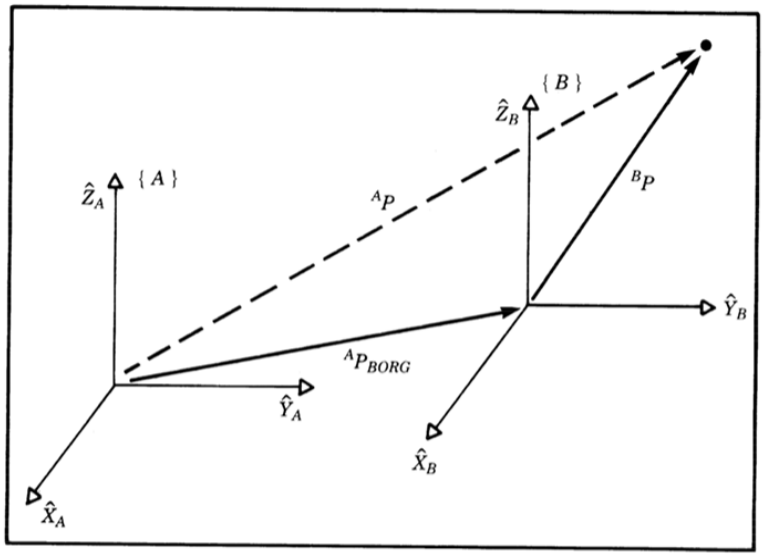


Figura 7.3: Traslazione di coordinate

7.1.2 Rotazione rigida

Se le terne A e B sono puramente ruotate, la matrice ${}^A_BR$ descrive l'orientamento di B relativamente ad A. Allora vale:

$$ {}^AP = {}^A_BR\,{}^BP \tag{7.2}$$

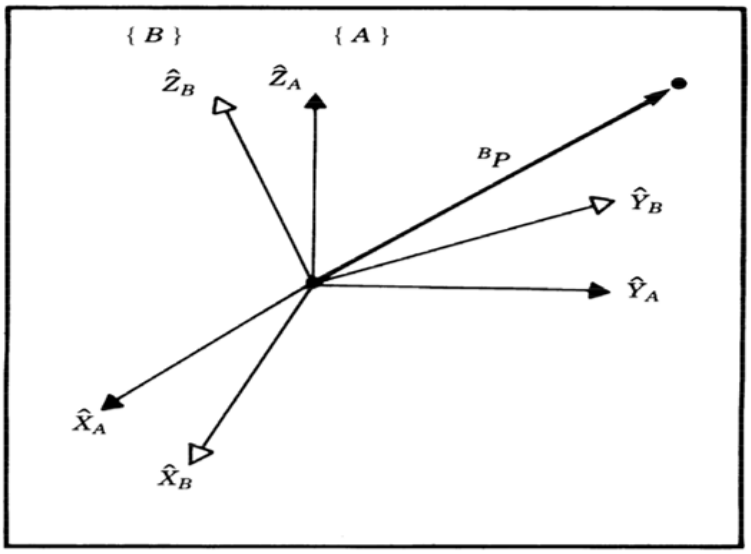


Figura 7.4: Rotazione rigida di sistemi di riferimento

Dove ${}^A_B R$ rappresenta la matrice di rotazione che permette di scrivere i versori della terna B riferiti alla terna A

$$ {}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \bullet \hat{X}_A & \hat{Y}_B \bullet \hat{X}_A & \hat{Z}_B \bullet \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \bullet \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \bullet \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \bullet \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \bullet \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \bullet \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \bullet \hat{Z}_A \end{bmatrix} \tag{7.3} $$

Questa matrice da come si può notare ha su ogni colonna la scomposizione di un versore della terna di B nel sistema di riferimento A, di fatto permette di risalire da ${}^B P$ a ${}^A P$. Se si fa la trasposta di questa matrice si otterrà nelle colonne la scomposizone dei versori A nella terna B. Infatti: ${}^A_B R^T = {}^B_A R$.

Per le rotazioni attorno agli assi cartesiani sono facilmente ricavabili le matrici di rotazione e sono le seguenti:

$$ R(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \tag{7.4} $$

$$ R(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \tag{7.5} $$

$$ R(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7.6} $$

Se la terna C è ruotata di ${}^B_C R$ rispetto alla B ed a sua volta quest'ultima è ruotata di ${}^A_B R$ rispetto alla terna A, è possibile calcolare l'orientamento finale${}^A_C R$ di C relativamente ad A. Allora vale: ${}^A_C R = {}^A_B R {}^B_C R$

7.1.3 Rototraslazione

Se le terne A e B sono traslate e ruotate, occorre disporre sia della matrice ${}^A_B R$ che del vettore ${}^A P_B ORIG$. In questo caso si può trovare la descrizione di P nel SR A, a partire da quella in B, calcolando:

$$ {}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_B ORIG \tag{7.7} $$

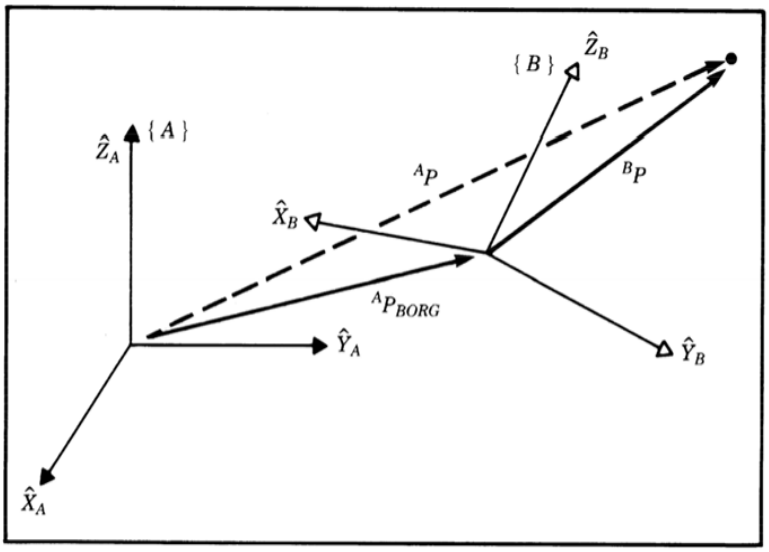


Figura 7.5: Rotazione rigida e traslazione di sistemi di riferimento

A tal fine occorre utilizzare vettori posizione a 4 componenti e matrici di trasformazione 4x4, cosicché la relazione sopra scritta ha in realtà la seguente forma:

$$\begin{bmatrix} {}^AP \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_BR & {}^AP_{BORIG} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^BP \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7.8}$$

$${}^A_BT = \begin{bmatrix} {}^A_BR & {}^AP_{BORIG} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix}$$

per cui:

$${}^AP = {}^A_BT\,{}^BP \tag{7.9}$$

${}^A_BT$ viene definita come la matrice di ***Trasformazione di coordinate dal sistema B al sistema A***

Tale formalismo è detto notazione omogenea. Le trasformazioni omogenee costituiscono un gruppo rispetto all'operazione di composizione. Si dimostra facilmente che vale: ${}^A_CT = {}^A_BT\,{}^B_CT$

Dal punto di vista computazionale il prodotto si calcola come:

$${}^A_CT = \begin{bmatrix} {}^A_BR\,{}^B_CR & {}^A_BR\,{}^BP_CORIG + {}^AP_{BORIG} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7.10}$$

Inoltre, con la notazione introdotta, si trova che ${}^A_BT = {}^B_AT^{-1}$, che viene calcolata come:

$$ {}^{B}_{A}T = \begin{bmatrix} & {}^{A}_{B}R^{T} & & -{}^{A}_{B}R^{T\,A}P_{BORIG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7.11} $$

7.2 Analisi cinematica di posizione

I sistemi meccanici sono realizzati tramite la connessione di vari membri secondo una catena cinematica che può essere di tipo seriale, dove ogni accoppiamento tra corpi è di tipo binario, parallela, nella quale si realizza un circuito chiuso, o, nei casi più complessi, da una composizione delle due tipologie, con più anelli chiusi e catene aperte. La trattazione sviluppata nel seguito farà riferimento in generale a sistemi meccanici di corpi rigidi connessi in catena aperta. Opportune variazioni consentono di estendere la formulazione agli altri casi menzionati. Le equazioni cinematiche di un sistema meccanico possono essere ottenute attraverso la scrittura di apposite matrici $4x4$ che definiscono la posa dei corpi rigidi (posizione e orientamento) presenti nella catena cinematica, sono le cosiddette I membri di un generico sistema meccanico vengono numerati da 1 ad "n" a partire dal telaio, che viene convenzionalmente indicato come membro 0; analogamente sono indicate le coppie cinematiche che uniscono i vari membri. Il moto relativo di due membri adiacenti è causato dal moto del giunto che li connette Un sistema meccanico in catena aperta composto da $n+1$ membri, ha m giunti, ognuno dei quali è azionato da un attuatore, per cui si dice che ha m mobilità o m assi. A questa famiglia appartengono i manipolatori o robot seriali. La posa (posizione e orientamento) del dispositivo terminale del robot è pertanto determinata dagli spostamenti dei vari giunti.Per descrivere la posizione e l'orientamento del membro terminale rispetto alla base, si dota ogni membro della catena cinematica di un sistema di riferimento ad esso solidale e si operano le successive trasformazioni omogenee.

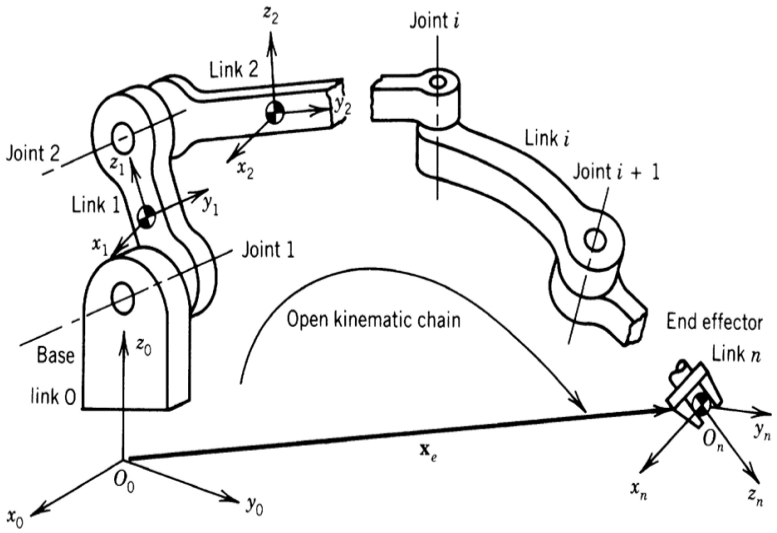


Figura 7.6: La catena cinematica di un robot seriale

Indipendentemente dal tipo di giunto, lo spostamento relativo al giunto i viene indicato con q_i , pertanto è:

- $q_i = \theta_i$ per giunti rotoidali
- $q_i = d_i$ per giunti prismatici

La matrice di trasformazione di ogni membro, quindi, può essere pensata come costruita a partire dalla conoscenza di 3 parametri costanti (che definiscono la geometria del membro e del suo accoppiamento) e da una variabile, ovvero la q_i

$$ {}^{i-1}_{i}T = {}^{i-1}_{i}T(q_i) \tag{7.12} $$

$$ {}^{0}_{n}T(q_1 \dots q_n) = {}^{0}_{1}T(q_1){}^{1}_{2}T(q_2) \dots {}^{n-1}_{n}T(q_n) \tag{7.13} $$

Moltiplicando tra loro le matrici di trasformazione si riesce a conoscere quale è la matrice totale che fa passare dalla terna riferita all'end-effector alla terna riferita alla base. In tal modo si può sapere la posizione esatta del terminale del robot rispetto alla sistema assoluto, essa ovviamente dipenderà dalle coordinate di giunto che sono dentro le varie matrici di trasformazione che ripercorrono la catena cinematica.

La configurazione dl robot e quindi la posa di ogni suo componente (ad es. del suo dispositivo di estremità) può essere espressa utilizzando le coordinate dei giunti oppure un sistema cartesiano definito. L'operazione di conversione tra le coordinate che rappresentano la posa del robot in diversi sistemi di riferimento è chiamata trasformazione di coordinate. Ci sono due approcci alla cinematica del robot: uno diretto e uno inverso.

Il problema cinematico diretto consiste nella determinazione della posa del dispositivo di estremità nel riferimento di base (o in quello assoluto) quando siano note le coordinate ai giunti. In altre parole il problema cinematico diretto consiste nel determinare il movimento del dispositivo di estremità quando siano noti i movimenti dei motori. Questo problema è relativamente semplice ed ha soluzione unica.

Il problema cinematico inverso (in termini di posizione) consiste nel determinare l'insieme di spostamenti dei giunti che portano il terminale del meccanismo in un assegnato punto con orientamento prefissato. Anche questo problema si risolve a partire dalle equazioni riportate, che dopo aver svolto le moltiplicazioni indicate possono essere riscritte nella forma:

$$ T = {}^{0}_{n}T(q_1 \dots q_n) \tag{7.14} $$

In questo caso il termine di sinistra è assegnato, mentre occorre calcolare le varie q_i a partire dalla loro espressione contenuta nel membro di destra; il problema è molto complesso dal punto di vista numerico.

Lo studio cinematico fin qui svolto può essere efficacemente descritto in termini di applicazioni tra due spazi vettoriali notevoli, che vengono ora introdotti. L'insieme delle n variabili di giunto q_i può essere raccolto nel vettore delle coordinate interne $\mathbf{q}$:

$$ \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} $$

Lo spazio di tutti i vettori q è chiamato spazio dei giunti ed è uno spazio n-dimensionale (di solito n vale 5 o più spesso ancora 6). Ogni vettore q descrive in realtà una configurazione del manipolatore; tuttavia q viene anche chiamato vettore posizione nello spazio dei giunti, perché, tramite l'applicazione della cinematica diretta, fornisce una espressione alternativa della posizione (e dell'orientamento) del terminale del manipolatore in tale spazio.

Analogamente la posizione e l'orientamento del dispositivo terminale possono essere raccolti anch'essi nel vettore delle coordinate esterne **p**:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

Lo spazio di tutti i vettori p è chiamato spazio cartesiano o spazio di lavoro o spazio dei compiti ed è solitamente uno spazio a 6 dimensioni. Il vettore p viene spesso chiamato vettore posizione nello spazio di lavoro, in quanto consente di esprimere la posizione (e l'orientamento) del dispositivo terminale di un manipolatore e quindi anche di definirne il compito. A volte i compiti del manipolatore sono descritti con riferimento a spazi con dimensioni inferiori a 6, come per esempio nei manipolatori piani, per i quali il compito più generico è a 3 gradi di libertà. Nel caso più generale, quindi, si fa riferimento ad un vettore posizione ad m componenti (in cui è sempre $m <= 6$). L'analisi cinematica di posizione diretta può anche essere riscritta in forma più generale a partire dall'espressione precedentemente introdotta:

$$T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = {}^{0}_{n}T(q_1 \dots q_n) \tag{7.15}$$

$$p = \Phi(q) q \in \Re^n, \qquad q \in \Re^m, \qquad \Phi : \Re^n \to \Re^m$$

A seconda della forma di **p**, **Φ** è già definita in forma esplicita o deve essere esplicitata a partire dalla conoscenza della matrice T ; per esempio, nei casi finora illustrati di spazio di lavoro a 6 dimensioni, Φ è già in forma chiusa per quanto riguarda i componenti di posizione del vettore p, mentre deve essere esplicitata la forma di Φ che corrisponde agli angoli di rotazione utilizzati. Ovviamente è sempre possibile "immergere" il vettore delle coordinate esterne nello spazio a 6 dimensioni, tuttavia alcune configurazioni cinematiche fanno in realtà variare solo alcune delle 6 coordinate di posizione ed orientamento, per cui si può far riferimento a sistemi "ridotti" (per esempio piani). Il **problema diretto** ha sempre una ed una sola soluzione nel caso di manipolatori seriali, a parte l'eventuale duplicazione nel calcolo degli angoli di rotazione del terminale, che definiscono comunque un unico assetto. Tale problema è risolubile in forma generale per qualsiasi struttura cinematica, come mostrato.

Utilizzando tale formalismo, il problema cinematico inverso consiste nell'invertire la precedente

applicazione non-lineare per ottenere:

$$q = \Phi^{-}1(p)q \in \Re^n, \qquad q \in \Re^m, \qquad \Phi^{-1} : \Re^m \to \Re^n$$

L'inversione di tale relazione per manipolatori seriali comporta vari problemi e non è calcolabile esplicitamente se non per casi particolari: si tratta, in definitiva, delle difficoltà tipiche della risoluzione di sistemi di equazioni non lineari (in questo caso trascendenti). Tra i vari aspetti del problema, è notevole per importanza quello dell'esistenza e del numero delle soluzioni: proprio il fatto che possa nascere una molteplicità di soluzioni (cioè di configurazioni) diverse, tra le quali è spesso possibile scegliere quella più idonea, assegna a questo problema il nome di analisi delle configurazioni.

7.2.1 Esistenza delle soluzioni

A differenza del caso diretto, in cui una soluzione esiste sempre, nello studio della cinematica inversa, per manipolatori seriali, non è sempre garantita l'esistenza della soluzione: in particolare ciò si verifica (a parte casi specifici) se il manipolatore non ha un numero di assi almeno pari al numero di gradi di libertà richiesti al compito, ovvero se: $\mathbf{n < m}$. Tuttavia anche nel caso: $\mathbf{n > m}$ il problema può risultare impossibile; prima di tutto bisogna osservare che disporre di n assi non significa necessariamente che il membro terminale possegga n gradi di libertà (si pensi al caso di sole coppie prismatiche: è evidente che il terminale del manipolatore mantiene sempre un orientamento costante). Ma anche nel caso in cui le n coppie elementari siano disposte sulla catena cinematica in modo tale da dotarla di n gradi di libertà, alcune porzioni dello spazio tridimensionale possono risultare fuori portata per il robot (per es. nel caso di sole coppie rotoidali, è evidente che non potranno mai essere raggiunti i punti al di fuori di una sfera di raggio sufficientemente elevato). Viene chiamato spazio di lavoro primario (reachable workspace o spazio di lavoro raggiungibile) l'insieme dei punti dello spazio raggiungibili dal manipolatore e spazio di lavoro secondario (dextrous workspace o spazio di lavoro destro) l'insieme dei punti in cui il manipolatore può arrivare assumendo qualsiasi orientamento. È evidente che (per definizione) il problema cinematico inverso ammette sempre almeno una soluzione all'interno dello spazio secondario, non ne ammette alcuna al di fuori dello spazio di lavoro (primario), mentre non è garantita l'esistenza della soluzione all'interno dello spazio primario. Si noti che la geometria dello spazio di lavoro non è determinata esclusivamente dalla topologia della catena e dalle dimensioni geometriche dei membri, ma anche dalle limitazioni di mobilità dei vari giunti.

7.2.2 Soluzioni multiple

Solitamente il problema cinematico inverso per manipolatori seriali ammette soluzioni multiple; tale problema è spesso indicato con il nome di analisi delle configurazioni in quanto occorre valutare quale delle soluzioni ammissibili (ognuna delle quali corrisponde ad una differente configurazione del robot nello spazio) sia più adatta allo svolgimento del compito assegnato. Per esempio il

più generico robot a 6 assi composto da sole coppie rotoidali ammette fino ad un massimo di 16 soluzioni.

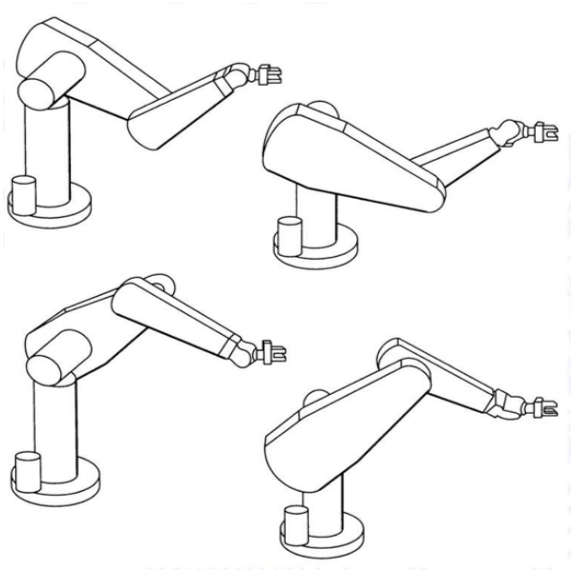


Figura 7.7: 4 diverse posture per un robot PUMA corrispondenti alla stessa posa nello spazio di lavoro

Alcune soluzioni fornite dagli algoritmi di cinematica inversa devono essere scartate perché non realizzabili tramite le effettive coppie di cui è dotato il robot (sfilamenti finiti per le coppie prismatiche; rotazioni limitate per le coppie rotoidali); altre soluzioni possono portare il robot in configurazioni non desiderate (per es. ad urtare contro ostacoli nello spazio di lavoro). Il problema cinematico inverso di posizione si presenta indeterminato nei casi di ridondanza. Si dice che un robot è ridondante quando presenta un numero di mobilità superiore ai gradi di libertà del compito assegnato, ovvero n > m. Evidentemente in questo caso la soluzione può essere scelta tra un numero infinito di alternative, per cui si ricorre spesso a tecniche di ottimizzazione che tengano in considerazione i vincoli del problema

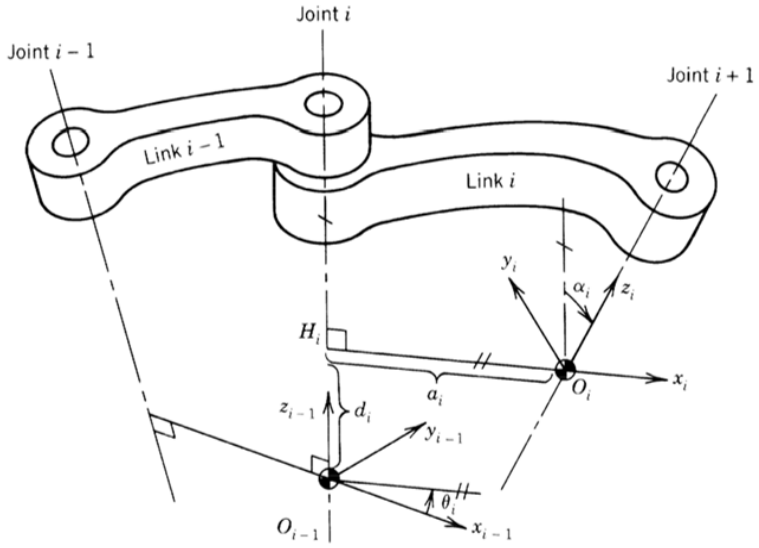
7.2.3 Singolarità

Ci sono alcune pose nello spazio di lavoro che risultano critiche per il funzionamento del robot e che pertanto devono essere evitate: tali pose si chiamano singolari. In queste pose, nonostante si abbia $n = m$, il problema inverso di posizione ammette un numero finito o infinito di soluzioni (a seconda dei casi) ma quello di velocità non è generalmente risolubile, per cui il robot non è in definitiva controllabile. Se la cinematica inversa viene espressa attraverso relazioni esplicite nelle coordinate esterne, i punti singolari si presentano generalmente come zeri al denominatore di espressioni frazionarie. I punti di singolarita sono quei punti per cui il determinate dello Jacobiana si annulla, ciò comporta che non si riesce a risalire al vettore di velocità dei giunti una volta

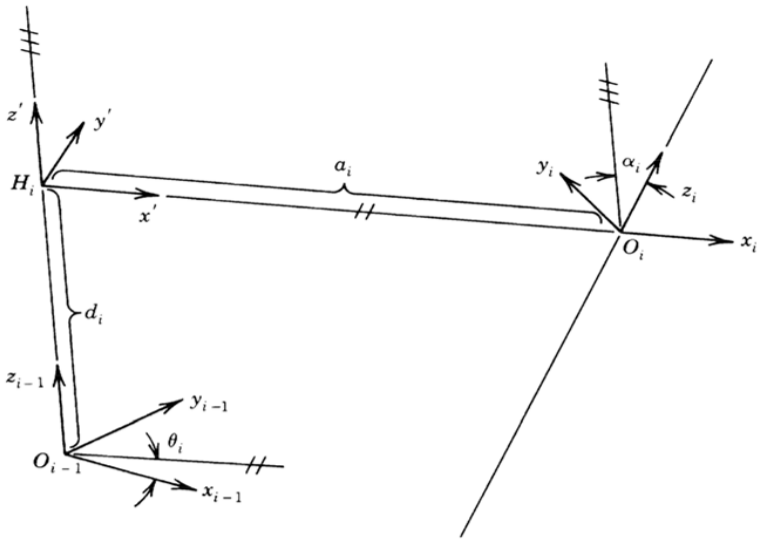
impostato il vettore velocità nello spazio cartesiano. In questo elaborato non viene tratta l'analisi di velocità, per maggiori approfondimenti fare riferimento a testi specifici.

7.3 Notazione di Denavit-Hartember

La rappresentazione di Denavit-Hartenberg è un metodo sistematico di descrivere attraverso 4 parametri la relazione cinematica tra una coppia di membri adiacenti connessi in modo seriale. Bisogna osservare che ci sono molte convenzioni che vanno sotto il nome di notazione di Denavit-Hartenberg, pur differendo per lievi dettagli l'una dall'altra. La prima operazione è la definizione delle terne solidali ai membri: essa è illustrata in figura, ove è ovviamente indicata con i la terna solidale al membri i-esimo; si noti che essa è centrata sul giunto (i+1)-esimo.



L'origine O_i di i è determinata dall'intersezione dell'asse del giunto (i+1)-esimo con la normale comune tra l'asse stesso e l'asse del giunto precedente. L'asse Xi è scelto su tale normale, mentre l'asse Zi giace sull'asse del giunto (i+1)-esimo; l'asse Yi viene scelto in modo da disporre di una terna ortonormale destrorsa. La localizzazione relativa di due terne consecutive è completamente determinata dai 4 parametri $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ mostrati in figura.



È importante notare che nel caso il giunto "i" sia di tipo rotoidale, la rotazione relativaθ_i cambia mentre il giunto si muove, mentre il disassamento di resta costante; se "i", invece, è un giunto prismatico, il disassamento di varia mentre la rotazione d_i è costante. In entrambi i casi, quindi, uno dei due parametri varia a causa del moto (e viene chiamato variabile di giunto o variabile di coppia), mentre l'altro rimane costante. Per esempio, per un robot a 6 assi sono quindi sufficienti 6x3=18 parametri per definirne completamente la struttura dal punto di vista geometrico; la specificazione degli ulteriori 6 parametri permette di apprezzarne la configurazione attuale nello spazio (o la sua evoluzione temporale se sono definite le loro leggi temporali). La relazione cinematica tra i membri adiacenti può essere facilmente formulata utilizzando le matrici di trasformazione in coordinate omogenee. La matrice ${}_{i}^{i-1}T$ esprime la posizione e l'orientamento del sistema i rispetto al sistema $i-1$ ed è da data dalla seguente formula:

$$ {}_{i}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\theta_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_1\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7.16} $$

dove si ha che:

- $\mathbf{a_i}$ indica di quanto devo spostare la terna lungo l'asse x_i (verso positivo concorde con x_i);
- $\mathbf{d_i}$ indica di quanto devo spostare la terna lungo l'asse z_{i-1} (verso positivo concorde con z_{i-1});
- $\theta_\mathbf{i}$ indica di quanto devo ruotare x_{i-1} per farlo coincidere con x_i lungo l'asse z_{i-1};
- $\alpha_\mathbf{i}$ indica di quanto devo ruotare z_{i-1} per farlo coincidere con z_i lungo l'asse x_i;

In questo lavoro si userà l'approccio cinematico diretto. Infatti si è interessati a conoscere la posizione di ogni singolo membro del robot al variare di tutte le possibili configurazioni degli angoli θ_i che possono essere date dai 6 motori. Nello specifico si vuol sapere dove si trova il baricentro di ogni membro così poi da risalire alla posizione del baricentro totale del robot e fare valutazioni relative alla stabilità del sistema. Per risolvere tale cinematica si fa uso della notazione di Denavit-Hartemberg

Capitolo 8

Risoluzione cinematica diretta del TM5 e del TM12 e calcolo delle posizione del baricentro del sistema

L'obbiettivo finale di questa parte di lavoro è quello di riuscire a calcolare dove si andrà a posizionare il baricentro totale del sistema formato da AMR e tutto ciò che sta sopra l'AMR, ovvero:piastra, controller, TM5 o TM12, colonna di sollevamento o colonna stazionaria e peso massimo che può sollevare il robot. Per fare ciò per prima cosa occorre conoscere la posizione del baricentro del braccio robotico che è la più complessa da calcolare in quanto ovviamente varia al variare degli angoli di giunto.

Per calcolare la posizione del baricentro del robot è necessario risolvere la cinematica diretta del robot. Infatti al variare di tutte le possibili configurazione dei giunti è necessario sapere dove si trova il baricentro dei singoli giunti in modo tale poi da calcolare il baricentro totale del robot.
Occorre quindi calcolare tutte le matrici di trasformazione introdotte nel capitolo 7 per riuscire una volta noti gli angoli di giunto a calcolare le posizioni dei baricentri riferiti alla terna fissa del robot.

Per fare ciò si è utilizzata la notazione di denavit-hartemberg che permette di calcolare le matrici di trasformazione in maniera facile. Per i riferimenti teorici fare riferimento alla sezione 7.3.

Innanzitutto si sono poste le terne di riferimento seguendo la notazione D-H sul braccio robotico seguendo lo schema riportato nella seguente figura.

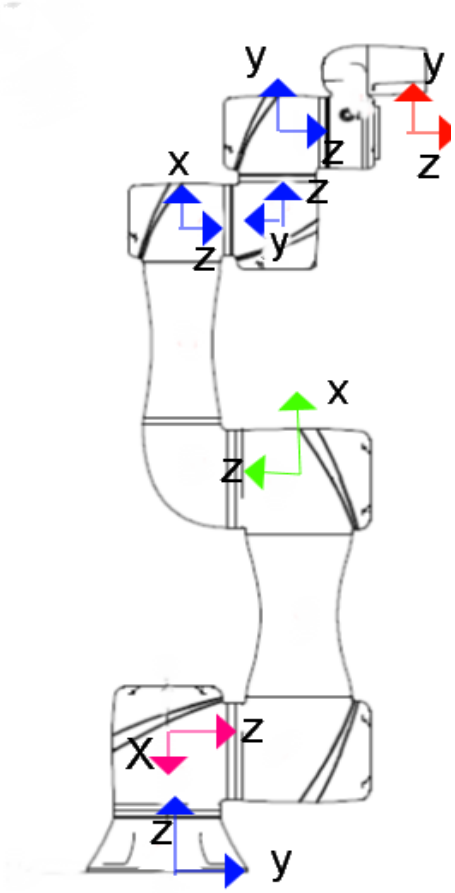


Figura 8.1: Posizionamento terne di Denavit Hartemberg sul TM5

8.1 Analisi statica TM5-900

Grazie alla posizione delle terne sui vari giunti è stato possibile calcolare i 4 parametri che caratterizzano ogni matrice di trasformazione di Denavit per il TM5-900. Per quanto riguardano le lunghezze da inserire, sono state dedotte a partire dalle dimensioni in figura 6.2. Vengono riportati in tabella:

Tabella 8.1: Valori dei 4 parametri di Denavit Hartemberg TM5

Passaggio terna	d_i [mm]	a_i [mm]	α_i [deg]	θ_i [deg]
0-1	145	0	-90	θ_1
1-2	146	429	+180	$\theta_2 - 90$
2-3	129	411	-180	θ_3
3-4	106	0	-90	$\theta_4 - 90$
4-5	106	0	+90	θ_5
5-6	113	0	0	θ_6

Con questi parametri è facilmente calcolabile la matrice di trasformazione per ogni giunto e ripercorre cosi la catena cinematica. Da come si può notare dalla figura 8.1 le terne sono poste partendo dal primo giunto che viene considerato a terra ed è numerata come terna 0. Si riprende qui per maggiore chiarezza la matrice di trasformazione di Denavit-Hartemberg introdotta nel capitolo 7:

$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\theta_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_1\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.1} $$

Applicando tale definizione alla trasformazione di coordinate che va dalla terna 0 alla terna 1 si ottiene la seguente matrice di trasformazione:

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\theta_i & \sin\theta_i\sin(-90) & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos(-90) & -\cos\theta_i\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 145 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.2} $$

Tale matrice permette di trasformare un vettore espresso nelle coordinate della terna "1" in un vettore espresso nelle coordinate della terna "0".

Si calcolano tutte le matrici di trasformazione usando la definizione di D-H, in tal modo si avranno tutte matrici di trasformazioni singole che permettono di ripercorre il movimento relativo che c'è tra due giunti adiacenti. Successivamente moltiplicandole tra loro si riuscirà ad avere la matrice di trasformazione che permette di passare dalla terna sull'end-effector alla terna fissa:

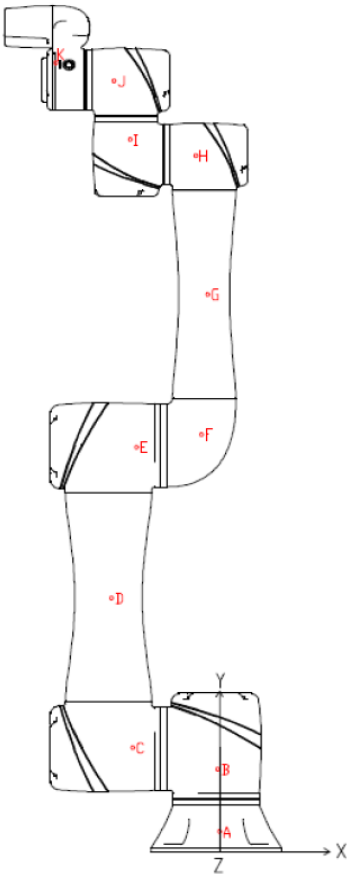
$$ {}^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T \dots {}^{5}_{6}T \tag{8.3} $$

Tale matrice permette una volta nota la posizione del oggetto rispetto al end-effector di risalire alla posizione in termini assoluti rispetto alla terna fissa del telaio.

Si ricorda che l'obbiettivo finale di questa parte di trattato è quella di risalire in termini assoluti alla posizione del baricentro di ogni singolo link del robot.

Per fare ciò si deve innanzitutto descrivere la posizione in termini relativi del baricentro di ogni link. Nel particolare si deve descrivere la posizione del baricentro del link $i - esimo$ rispetto alla terna del giunto successivo $i + 1$, poi successivamente si moltiplicherà la posizione relativa per la matrice di trasformazione ${}^{0}_{i+1}T$

Si sono procurati dal produttore Omron la posizione esatta di tutti i baricentri dei singoli link e giunti con relativo peso. Essi sono espressi nella terna assoluta "0" disposta come in figura, successivamente viene fatta la trasformazione di posizione in termini relativi con le terne disposte come in figura 8.1.



2.1 Center of Mass

A: mass=0.6Kg ; center of mass=[0, 28mm, 0]
B: mass=4.1Kg ; center of mass=[-2.19mm, 113.0mm, 0]
C: mass=4.1Kg; center of mass=[-114.67mm, 147.4mm, 0]
D: mass=1.2Kg ; center of mass=[-146mm, 359.7mm, 0]
E: mass=4.1Kg ; center of mass=[-114.67mm, 572.01mm, 0]
F: mass=0.5Kg ; center of mass=[-27.53mm, 590.96mm, 0]
G: mass=0.6Kg ; center of mass=[-16.3mm, 788.1mm, 0]
H: mass=1.7Kg ; center of mass=[-39.69mm, 984.54mm, 0]
I: mass=1.7Kg ; center of mass=[-121.14mm, 1009.09mm, 0]
J: mass=1.7Kg ; center of mass=[-145.69mm, 1090.54mm, 0]
K: mass=0.6Kg ; center of mass=[-219.18mm, 1134.21mm, 0]

Figura 8.2: Posizionamento dei baricentri dei vari membri TM5-900

Si riportano le posizione relative dei baricentri espresse nelle terne dei vari giunti.
Ad esempio nel caso del baricentro D la sua posizione deve essere espressa riferita alla terna fissata in 2 in modo tale che poi si avrà:

$$ {}^0P_D = {}^0_2T^2P_D = {}^0_1T^1_2T^2P_D \tag{8.4} $$

Tabella 8.2: Posizione relativa dei baricentri TM5-900

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
${}^1P_B$	0	32.2	2.19
${}^2P_C$	-426.8	0	+31.3
${}^2P_D$	-214	0	0
${}^3P_E$	-413.19	0	98.37
${}^3P_F$	-394.24	0	+11.23
${}^3P_G$	-197.1	0	0
${}^4P_H$	0	82.61	0.66
${}^5P_I$	0	-82.11	-1.16
${}^6P_J$	0	-0.34	-89.81
${}^6P_K$	0	43.01	-16.32

Successivamente è stato implementato un codice Matlab in cui una volta note queste posizioni relative dei vari baricentri e noti le matrici di trasformazioni Denavit-Hartemberg si calcola la posizione in termini assoluti di dei vari baricentri rispetto alla terna fissa telaio. Ovviamente questo calcolo deve essere ripetuto per tutte le possibili configurazioni degli angoli di giunto.

Per raggiungere questo obbiettivo si è per prima cosa costruita una Matlab-function che prevede il calcolo delle posizione dei baricentri. Tale function prevede in ingresso i 6 angoli di giunto e restituisce come output la posizione del baricentro totale del sistema (AMR con piastra, colonna, controller, robot, e carico max del robot) riferita alla terna del telaio.

Nello specifico la terna riferita al telaio viene posta sulla base della piastra a 60 mm dietro le due ruote grandi centrali dell'AMR (si ricorda che il baricentro dell'AMR è posto a 16.5 mm dietro la mezzeria, quindi si è deciso di spostare il cobot ancora ulteriormente dietro) con l'asse Z che punta verso l'alto, l'asse Y posto longitudinalmente verso il di dietro del robot mobile e l'asse X a completare una terna destrorsa.

La function nello specifico permette di calcolare, grazie ai 6 angoli di giunto che gli vengono forniti dal programma principale, le 6 matrici di DH e successivamente la posizione del baricentro rispetto al telaio grazie, ad esempio nel caso del punto D, all'equazione 8.4.

Per spaziare tutte le possibili configurazioni degli angoli di giunto, nel main vengono implementati 6 cicli for uno dentro l'altro in modo da avere alla fine come output tutte le possibili configurazioni dei 6 angoli. Nello specifico i for vanno tutti da 0 a 360° tranne il terzo giunto che va da $-155°$ a $+155°$. L'incremento per ogni for sono i seguenti:

- 1°giunto $\rightarrow 30°$
- 2°giunto $\rightarrow 50°$

- 3°giunto → 45°
- 4°giunto → 72°
- 5°giunto → 72°
- 6°giunto → 72°

Nel primo giunto si è dato un incremento più piccolo in modo tale da osservare con maggiore precisione la simmetria rispetto all'asse Z della posizione dei baricentri, negli ultimi 3 giunti l'incremento è più grande visto che la singola configurazione del polso non sposta di molto la posizione del baricentro totale.

Come risultato finale si ottiene un grafico in cui vengono plottati tutte le posizioni dei singoli baricentri (si plotta solamente le coordinate X e Y in modo tale da vedere che impronta si ha) e si plotta la piastra esterna dell'AMR in magenta e in verde l'impronta delimitata dalle 6 ruote del robot. Successivamente tramite la funzione convexHull di Matlab si delimita in rosso quali sono i punti più esterni delle posizioni dei vari baricentri.
Si riporta di seguito la figura:

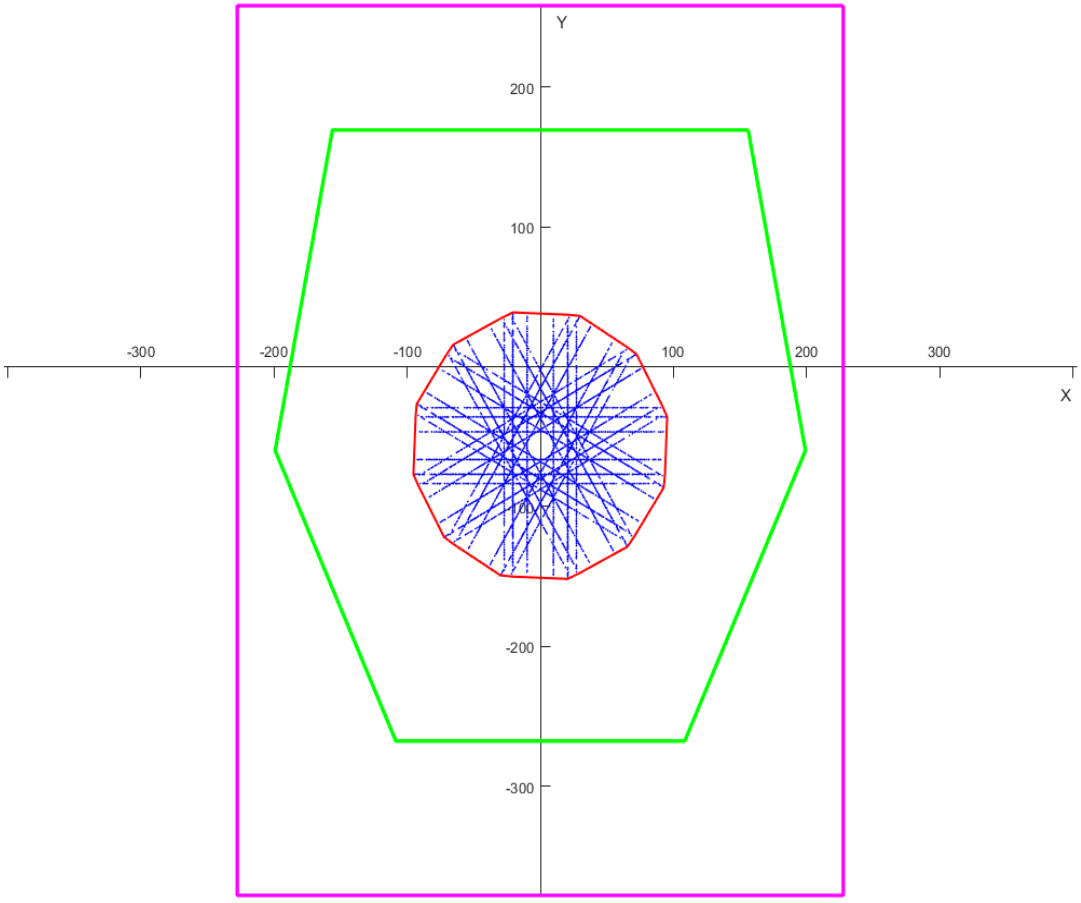


Figura 8.3: Posizione dei vari baricentri del sistema complessivo

Come si può osservare dalla figura 8.3 il baricentro rientra sempre abbondantemente dentro il perimetro delimitato dalle 6 ruote dell'AMR.Ciò vuol dire che nel caso statico, ovvero ipotizzando un movimento infinitamente lento che non scarica forze di inerzia a telaio del robot mobile, il sistema rimane in equilibrio e non si ribalta. Ciò è verificato per ogni configurazione che può assumere il robot. Si ricorda che i pesi considerati in questa fase sono:

- massa AMR:62Kg
- massa TM5:20.3Kg (sarebbe la somma del peso di tutti i link forniti dalla Omron)
- massa Piastra:16Kg
- massa Controller:13.5Kg
- massa Colonna:15Kg
- massa Carico:4Kg

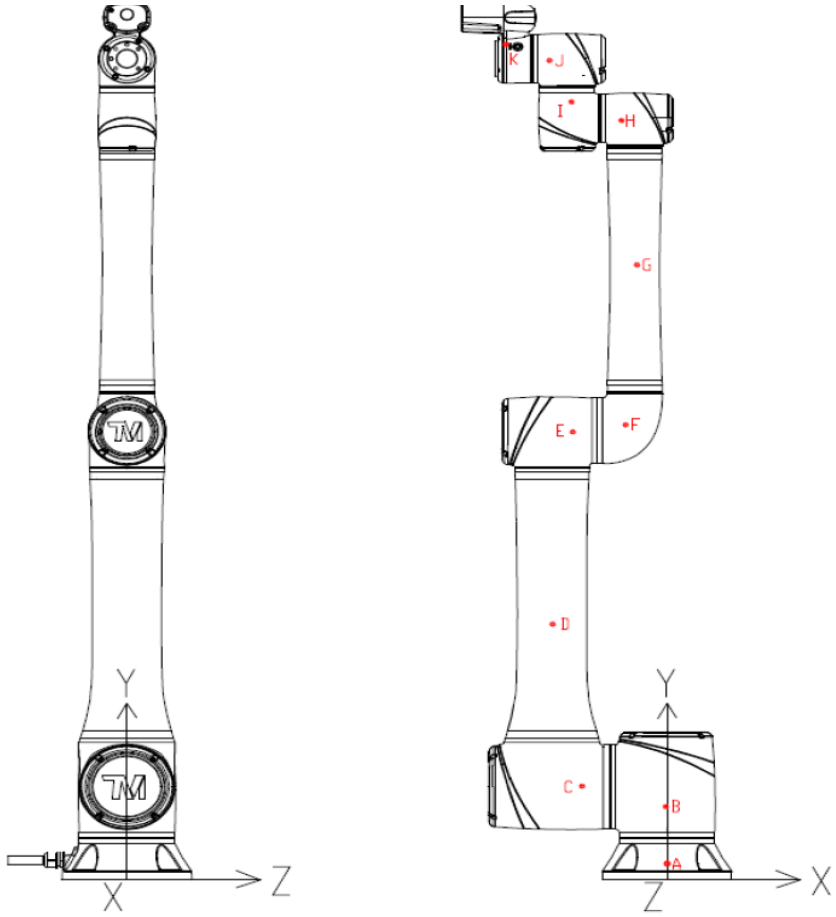
Il carico viene considerato con il suo baricentro alla massima distanza dalla flangia del robot, in questo caso di 160 mm.

8.2 Analisi statica TM12

La stessa identica cosa viene effettuata per il TM12, ovviamente cambiano le masse e le dimensioni in gioco in quanto il TM12 è un cobot molto più grande in grado di manovrare fino a 12 Kg mentre il TM5 fino a 4 kg.

Le terne fissate sui giunti rimangono le stesse mentre cambiano solo le lunghezze coinvolte nei parametri di D-H.

Si riporta di seguito un'immagine delle posizione dei baricentri e delle masse dei vari membri del cobot.



3.1 Center of Mass

A: mass=1.5Kg ; center of mass=[0, 29mm, 0]
B: mass=7.9Kg ; center of mass=[-1.5mm, 123.7mm, 0]
C: mass=7.9Kg; center of mass=[138.5mm, 166.7mm, 0]
D: mass=2.3Kg ; center of mass=[-180mm, 479.2mm, 0]
E: mass=4.1Kg ; center of mass=[-148.7mm, 799.1mm, 0]
F: mass=0.5Kg ; center of mass=[-61.5mm, 818mm, 0]
G: mass=1.2Kg ; center of mass=[-50.3mm, 1088.4mm, 0]
H: mass=1.7Kg ; center of mass=[-73.7mm, 1358mm, 0]
I: mass=1.7Kg ; center of mass=[-155.1mm, 1382.6mm, 0]
J: mass=1.7Kg ; center of mass=[-179.7mm, 1464mm, 0]
K: mass=0.6Kg ; center of mass=[-253.2mm, 1507.7mm, 0]

Figura 8.4: Posizionamento dei baricentri dei vari membri TM12

Nella tabella sottostante si riportano i parametri di D-H:

Tabella 8.3: Valori dei 4 parametri di Denavit Hartemberg TM5

Passaggio terna	d_i [mm]	a_i [mm]	α_i [deg]	θ_i [deg]
0-1	165.2	0	-90	θ_1
1-2	180	636.1	+180	$\theta_2 - 90$
2-3	129	557	-180	θ_3
3-4	106	0	-90	$\theta_4 - 90$
4-5	106	0	+90	θ_5
5-6	113	0	0	θ_6

Si riportano anche le posizioni relative dei veri baricentri riferiti alla terna mobile che li succede:

Tabella 8.4: Posizione relativa dei baricentri TM5-900

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
${}^1P_B$	0	41.5	1.5
${}^2P_C$	-634	0	+41.3
${}^2P_D$	-322	0	0
${}^3P_E$	-559	0	98.7
${}^3P_F$	-540	0	+11.23
${}^3P_G$	-269.9	0	0
${}^4P_H$	0	82.61	0.66
${}^5P_I$	0	-82.11	-1.16
${}^6P_J$	0	-0.34	-89.81
${}^6P_K$	0	43.01	-16.32

Si effettua lo stesso identico calcolo con Matlab effettuato per il TM5-900 per ottenere la pianta dei baricentri, ovviamente si tiene conto delle differenti masse del robot e del carico:

- massa TM12:29.6.3Kg (sarebbe la somma del peso di tutti i link forniti dalla Omron)
- massa Carico:12Kg

Il carico viene considerato alla massima distanza possibile dalla flangia del robot ovvero 100 mm.
Si riporta la pianta ottenuta:

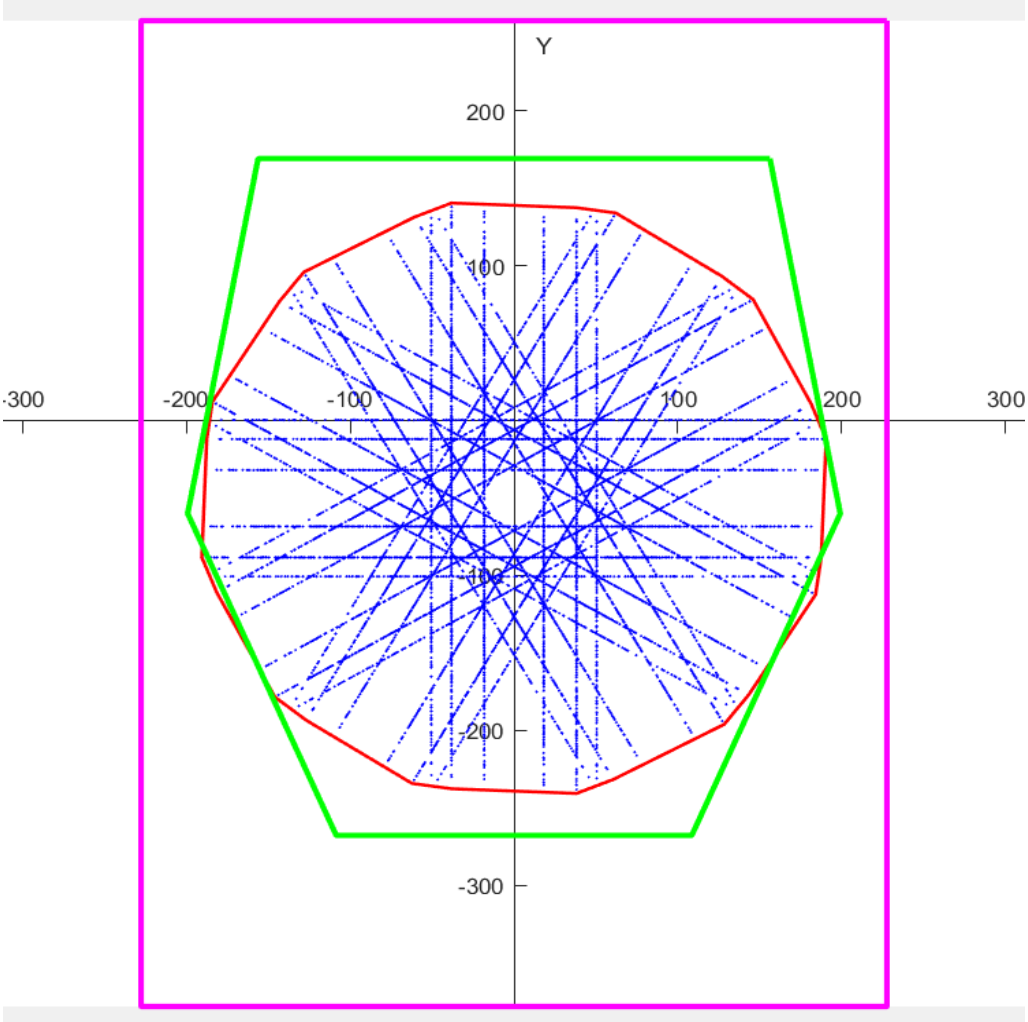


Figura 8.5: Posizione dei vari baricentri del sistema complessivo con il TM12

In questo caso la grande massa del TM12 con il relativo carico, come si evince dalla figura,fa si che il baricentro in molti casi vada esternamente alla pianta delimitata delle ruote, provocando quindi un ribaltamento. Occorrerà quindi ,come si prevedeva, un sistema che aiuti a mantenere il sistema stabile quando il braccio si muove.

Capitolo 9

Analisi dinamica del braccio robotico sopra all'AMR: caso TM5 e TM12

Nel capitolo 8 si è svolta un'analisi della stabilità del sistema dal punto di vista statico: ovvero non viene data accelerazione al braccio robotico ma si può immaginare che i giunti erogano la coppia necessaria per sorreggere il peso del braccio e niente più. Il braccio lavora in modalità free, ovvero tenendo premuto un pulsante sulla testa del terminale si può spostare il braccio a mano, rilasciando il pulsante esso si blocca in quella posizione.

Si è visto come nel caso del TM5 è garantita la stabilità dal punto di vista statico mentre nel caso del TM12 non lo è affatto.

Ora si vuole studiare invece la stabilità anche quando al cobot si impongono delle coppie per spostare il braccio e compiere determinati movimenti con le dovute velocità e accelerazioni. Tale caso è quello realistico ed è quello che può compromettere la stabilità poiché il cobot muovendosi scarica sul telaio delle forze e momenti di reazione che possono provocare il ribaltamento o strisciamento dell'intero sistema.

Ovviamente sarebbe opportuno studiare la dinamica e le forze che si scaricano sul telaio per ogni singola configurazione di giunto ma ciò è molto oneroso e complicato dal punto di vista computazionale poiché richiede di trasformare le matrici di inerzia ogni volta e di riportarle tutte all'unico sistema di riferimento assoluto a terra. Si è deciso quindi di analizzare due posizioni che potrebbero scaricare a telaio più forza e momenti di tutti e che sono sembrate da subito le più critiche:

- La prima è quella di braccio completamente disteso in verticale sopra l'AMR cosi come riportato in figura 8.1 e da questa posizione il secondo giunto applica la massima coppia (non quella di picco) per far ruotare bruscamente tutto il braccio attorno all'asse del secondo giunto e portarlo in posizione orizzontale.
- La seconda configurazione invece è la viceversa della prima: ovvero il braccio è disteso in orizzontale e si applica la massima coppia al secondo giunto per portare il braccio in verticale.

Queste due configurazioni verranno studiate sia per il TM5 che per il TM12, si partirà dal TM12 che già si è visto non essere stabile nemmeno dal punto di vista statico e poi si vedrà se invece il TM5 continua a essere stabile anche applicando momenti sui giunti.

9.1 Analisi dinamica TM12 braccio in verticale

Si analizza ora il caso del TM12. Per studiare la dinamica è di fondamentale importanza sapere le coppie che il robot è in grado di erogare e le inerzie dei vari membri visto che si tratta di rotazioni. La casa madre Omron ha fornito i dati necessari per l'analisi che vengono riportati qui di sotto sia per il TM5-900 che per il TM12:

Tabella 9.1: Valori di coppia per ogni giunto TM12

Giunto	Coppia nominale [Nm]	Coppia di picco [Nm]
1	311	353
2	311	353
3	118	157
4	34	54
5	34	54
6	34	54

Tabella 9.2: Valori di coppia per ogni giunto TM5-900

Giunto	Coppia nominale [Nm]	Coppia di picco [Nm]
1	118	157
2	118	157
3	118	157
4	23	43
5	23	43
6	23	43

Inoltre sono state acquisite le matrici di inerzia per ogni singolo link o joint del robot che sono riportate nella figura sottostante

B
[J1]

42678.914	2141.0623	0
2141.0623	26059.102	0
0	0	43809.472

C
[J2]

26059.102	2141.0623	0
2141.0623	42678.914	0
0	0	43809.472

D
[Arm1]

81102.746	0	0
0	6890.2164	0
0	0	81063.903

E
[J3]

8506.2275	-1674.722	0
-1674.7216	9593.4943	0
0	0	10188.394

F
[J-L]

1128.7937	0	-104.3545
0	897.75049	0
-104.35454	0	824.42175

G
[Arm2]

29473.258	0	0
0	1673.7402	0
0	0	29469.862

H
[J4]

1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.5503287	-0.256964	3683.7027

I
[J5]

3563.3795	132.08119	-0.256964
132.08119	1883.7782	-0.550329
-0.2569642	-0.550329	3683.7027

J
[J6]

1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.5503287	-0.256964	3683.7027

K
[IO]

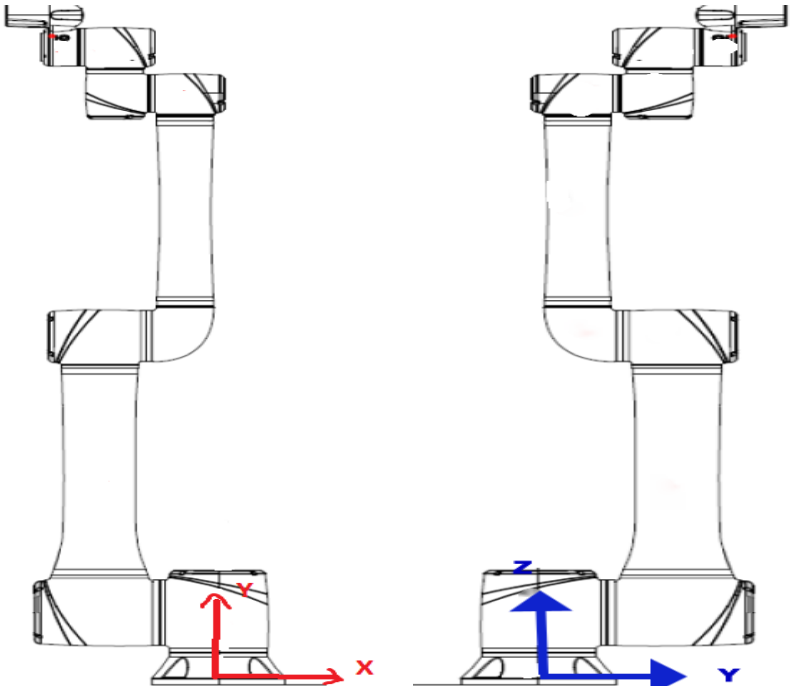
1250.2703	275.89287	0
275.89287	727.85014	0
0	0	1508.8818

Figura 9.1: Matrici di inerzia di ogni singolo link o joint TM12 ($Kgmm^2$ (le lettere sono quelle riportate nella figura8.4)

Queste matrici sono espresse secondo il sistema di riferimento della figura 8.4 con l'asse Y in alto e X verso destra.

Nella parte statica però si è lavorati con un sistema di riferimento diverso: ovvero Z verso l'alto e Y verso destra e il braccio non rivolto verso la parte sinistra ma girato verso destra (vedasi figura 8.1 prima terna in basso), pertanto si è deciso di mantenere anche qui questo sistema di riferimento assoluto.

Si è dovuti quindi ruotare le matrici per passare dal sistema **(a)** al sistema **(b)**.



(a) Sistema di riferimento iniziale **(b)** Sistema di riferimento finale

Figura 9.2: Passaggio dal sistema di riferimento iniziale a destra a quello finale a sinistra

Per fare ciò si è divisa la rotazione completa in due step:

- Il primo step prevede la rotazione della terna dalla rossa alla blu
- Il secondo step prevede il ribaltamento del braccio da sinistra a destra. Da tenere conto il fatto che le matrici di inerzia che alla fine del primo step erano solidali ai giunti e orientante seguendo il sistema blu, quando si ruota il robot si ritrovano con l'asse Y verso sinistra non più verso destra, per riportarlo a destra si deve applicare una matrice di rotazione attorno a Z di +180°

Si riporta di seguito la prima matrice di rotazione:

$$ {}^{B}_{a}R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{9.1} $$

quindi la prima rotazioni delle matrici di inerzia si ha applicando

$$ {}^{B}I = {}^{B}_{a}R^{a} I^{B}_{a} R^{T} \tag{9.2} $$

Poi successivamente si applica la seconda rotazione:

$$ {}^{a}_{B}R = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9.3} $$

$$ {}^{b}I = {}^{a}_{B}R\, {}^{B}I^{a}_{B}R^{T} \tag{9.4} $$

A questo punto si hanno tutte le matrici di inerzia di ogni singolo giunto e link nel sistema coretto, ovvero sistema di riferimento nel baricentro del link/joint e orientato cosi come il sistema blu della figura 9.2.

Si deve ora traslare tutte le matrici di inerzia dai rispettivi baricentri dove sono fissate, allo stesso punto che si è preso coincidere con il centro della base del robot. In tal modo poi si potranno sommare le matrici di inerzia poiché sono tutte quante rispetto allo stesso punto e stessa terna e si avrà la matrice di inerzia dell'intero robot in quella configurazione e poter poi applicare la seconda legge della dinamica.

Per fare ciò ovviamente si usa il *Teorema di Huygens Steiner*.

$$ \begin{aligned} I_{xx} &= I_{xx_G} + m(y^2 + z^2) \\ I_{yy} &= I_{yy_G} + m(z^2 + x^2) \\ I_{zz} &= I_{zz_G} + m(y^2 + x^2) \\ I_{zx} &= I_{zx_G} + m(z * x) \\ I_{zy} &= I_{zy_G} + m(y * z) \\ I_{xy} &= I_{xy_G} + m(y * x) \end{aligned} $$

Dove x, y, z sono le distanze dei vari baricentri rispetto alla terna fissa a terra. Da notare che essendo il robot simmetrico rispetto al piano YZ le coordinate x dei baricentri sono pari a zero. $I_{xx_G}\ldots$ invece sono le componenti della matrice di inerzia di ogni singolo componente fissata nel baricentro del componente.

Si costruisce una function MatLab che ha come input la massa del link/joint, la posizione del baricentro e la matrice di inerzia nel baricentro e restituisce in output la matrice di inerzia trasalta applicando *Huygens Steiner*. Tale function tramite un for viene ripetuta per tutti i membri del robot e man a mano che si calcolano le giuste matrici nel for vengono sommate.

A questo punto occorre calcolare anche i momenti che esercitano le forze esterne sul robot. Le uniche forze presenti sono quelle peso dei vari membri. Si introduce pertanto $\vec{P} = mg\hat{Z}$ e il $\vec{M_{peso}} = \vec{V_g} \wedge \vec{P}$ dove $\vec{V_g}$ è il vettore posizione dei baricentri dei singoli link/joint riferito sul sistema fisso a terra.

Si hanno tutte le informazioni necessarie per applicare la seconda legge della dinamica e trovare l'incognita ovvero il momento risultante che si scarica sul telaio.

$$\vec{M_{ext}} + \vec{M_{peso}} = I\dot{\omega} + \omega \wedge I\omega \tag{9.5}$$

Non si conosce quale sia l'accelerazione angolare che si ha quando si applica la coppia massima di 311 Nm sul 2° giunto poiché essa dipende dal carico e dalla configurazione del robot, tuttavia si conosce quale sia il carico e l'inerzia del braccio quindi tramite una formula inversa si può calcolarla.

La velocità angolare ω è pari a

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\pi rad/s \\ 0 \end{pmatrix} \tag{9.6}$$

180 deg/sec è la massima velocità imprimibile sul giunto. Ovviamente tale ipotesi che il braccio abbia già all'inizio questa velocità massima è sbagliata in quanto all'istante iniziale è zero ma è un ipotesi più conservativa.

In particolar modo scomponendo l'equazione vettoriale 9.5 nelle tre componenti e esaminando quella lungo il versore $\hat{Y}$ si ha che la componente $\omega \wedge I\omega$ è pari a zero e anche il $My_{peso} = 0$ quindi rimane solamente $My_{ext} = I_{yy}\dot{\omega}$ e dato che il My_{ext} è proprio pari al momento imprimibile sul giunto dal motore pari a -311 Nm ed è quello che anche si scarica poi sul telaio per azione e reazione si ha che:

$$\dot{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ -18.81 rad/s^2 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{9.7}$$

Da notare che il segno dell'accelerazione angolare dipende dl verso in cui si applica la coppia esterna del motore ma è indifferente dal punto di vista del calcolo in quanto ovviamente il robot può ruotare in ogni verso e per di più il problema è assial-simmetrico grazie alla rotazione garantita dal primo giunto. Mettendo segno opposto sull'accelerazione angolare varierà il segno della componente Y e Z del momento finale, ma non quella X

La I_{yy} è quella della matrice di inerzia totale del robot calcolata sulla base ed è pari a $16.85 Kgm^2$

Avendo nota la $\dot{\omega}$ è possibile calcolare $\vec{M_{ext}}$ che sono i momenti che il telaio deve esercitare sul robot per permettergli quella accelerazione poi ovviamente il momento che si scarica sul telaio sarà l'opposto di quello che va sul robot.

In conclusione si ha che il momento che il robot scarica sul telaio quando parte dalla posizione distesa in verticale e si applica la massima coppia sul secondo giunto è di:

$$\vec{M_{tel}} = \begin{pmatrix} -94 \\ 311 \\ 40 \end{pmatrix} Nm \tag{9.8}$$

Per quanto invece riguarda la risultante delle forze che si scaricano sul telaio si applica la prima legge della dinamica:

$$\vec{R_{ext}} = m\vec{a} \tag{9.9}$$

nel caso specifico:

$$\vec{R_{from-telaio}} + \vec{Peso} = m\vec{a_{tg}} + m\vec{a_{cent}} \tag{9.10}$$

l'accelerazione si scompone nelle sue componenti tangenziale e centripeta:

- $\vec{a_{tg}} = \dot{\omega} \wedge \vec{V_{gtot}}$
- $\vec{a_{cent}} = \vec{\omega} \wedge [\vec{\omega} \wedge \vec{V_{gtot}}]$

Dove con $\vec{V_{gtot}}$ si indica la posizione totale del baricentro del robot+carico in posizione distesa verticale.

Essendo noto tutto quanto si calcola la risultante che si scarica sul telaio che è pari a:

$$\vec{R_{to-telaio}} = \begin{pmatrix} 11 \\ 0 \\ -402 \end{pmatrix} N \tag{9.11}$$

Sono note ora le forze e i momenti che dalla base del robot si scaricano sul telaio, è quindi possibile a questo punto capire se tali forze e momenti possono provocare una instabilità dell'AMR.

I valori qui riportati riguardano il caso TM12 in posizione di partenza verticale.

Si analizza nelle sezioni successive il caso TM12 con posizione di partenza orizzontale e poi successivamente identicamente il caso TM5.

9.2 Analisi dinamica TM12 braccio in orizzontale

Si considera ora la seconda posizione di partenza critica, ovvero quella con braccio robotico disteso in orizzontale e con il 2° giunto che applica la massima coppia per far salire bruscamente il braccio e portarlo in posizione verticale (gli altri giunti rimangono bloccati).

La procedura da svolgere è identica a quella riportate per la posizione verticale, tuttavia c'è da aggiungere una rotazione in più della matrice di inerzia dovuta al fatto che quando il braccio dalla posizione verticale riportata in figura 9.2 passa alla posizione orizzontale, si trascina nella rotazione anche le matrici di inerzia che erano disposte secondo il sistema di riferimento blu portandole con l'asse Z uscente dal foglio e X verso il basso (rotazione di +90° attorno Y)

Occorre quindi applicare un ulteriore matrice di rotazione per riportare le matrici di inerzia solidali ai baricentri dei singoli link/joint nel sistema blu di 9.2.

Arrivati all'equazione (9.4) a questo punto si deve moltiplicare quella matrice di inerzia per la matrice di rotazione:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9.12}$$

$$^{b}I = R^{B}IR^{T} \tag{9.13}$$

Ovviamente tale rotazione si dovrà applicare a tutte le matrici tranne per quella del giunto "b" che non varia la propria orientazione.

A tal punto si avrà il braccio disposto in orizzontale con tutte le matrici di inerzia fissate nei vari baricentri dei link/joint e disposte secondo il sistema di riferimento blu di figura 9.2.

Si procede ora nello stesso identico modo del primo caso.

Si riportano i risultati del momento che si scarica a telaio e della forza:

$$\vec{M_{tel}} = \begin{pmatrix} -72 \\ 311 \\ 18 \end{pmatrix} Nm \tag{9.14}$$

$$\vec{R_{tel}} = \begin{pmatrix} 7.09 \\ 0 \\ -408 \end{pmatrix} N \tag{9.15}$$

9.3 Analisi dinamica TM5 in posizione verticale e orizzontale

Si valuta ora il caso LD90 con sopra montato il TM5, si è già visto che dal punto di vista statico il sistema è stabile, ma si dovrà verificare se anche quando si applicano momenti al TM.

Lo scopo di questa parte, come per il TM12, è arrivare ai $\vec{M_{tel}}$ e $\vec{R_{tel}}$.

La procedura è identica a quella del TM12, ma ovviamente cambiano i valori delle matrici di inerzia e quello di coppia massima che si assume in base ai dati forniti Omron secondo la tabella 9.2 pari a quella di picco 156 Nm.

Si riporta i valori delle matrici di inerzie dei singoli giunti per TM5-900. Sono riportate inizialmente nello stesso sistema di riferimento di quello del TM12 e quindi devono essere ruotate seguendo la stessa procedura della sezione precedente.

B

[J1]

9593.4943	1674.7216	0
1674.7216	8506.2275	0
0	0	10188.394

C

[J2]

8506.2275	1674.7216	0
1674.7216	9593.4943	0
0	0	10188.394

D

[Arm1]

15659.064	0	0
0	2816.3752	0
0	0	15659.857

E

[J3]

8506.2275	-1674.722	0
-1674.722	9593.4943	0
0	0	10188.394

F

[J-L]

1128.7937	0	-104.3545
0	897.75049	0
-104.3545	0	824.42175

G

[Arm2]

7054.7526	0	0
0	772.22421	0
0	0	7053.1804

H

[J4]

1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.550329	-0.256964	3683.7027

I

[J5]

3563.3795	132.08119	-0.256964
132.08119	1883.7782	-0.550329
-0.256964	-0.550329	3683.7027

J

[J6]

1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.550329	-0.256964	3683.7027

K

[IO]

1250.2703	275.89287	0
275.89287	727.85014	0
0	0	1508.8818

Figura 9.3: Matrici di inerzia di ogni singolo link o joint TM5 ($Kgmm^2$) (le lettere sono quelle riportate nella figura**??**)

Implementando lo stesso codice MatLab di prima si arriva ai seguenti risultati nel caso di braccio verticale:

$$\vec{M_{tel}} = \begin{pmatrix} -44 \\ 156 \\ 20 \end{pmatrix} Nm \tag{9.16}$$

$$\vec{R_{tel}} = \begin{pmatrix} 11.41 \\ 0 \\ -232 \end{pmatrix} N \tag{9.17}$$

Identico al caso TM12 orizzontale ma con valori numerici diversi si ha:

$$\vec{M_{tel}} = \begin{pmatrix} -29 \\ 156 \\ 10 \end{pmatrix} Nm \tag{9.18}$$

$$\vec{R_{tel}} = \begin{pmatrix} 5.73 \\ 0 \\ -240 \end{pmatrix} N \tag{9.19}$$

Capitolo 10

Studio dei risultati ottenuti nell'analisi dinamica

In questo capitolo si andranno ad esaminare i risultati ottenuti nel capitolo precedente, ovvero se i momenti e le forze ($\vec{M_{tel}}$ e $\vec{R_{tel}}$) che si scaricano a telaio prodotti dal movimento del robot soprastante sono sufficienti a provocare un eventuale ribaltamento o strisciamento del sistema.

Esaminando i valori ottenuti si evince che la situazione più critica è quella del TM12 in posizione di partenza verticale, infatti i valori di momenti e forze sono i maggiori. Ciò ovviamente è scontato rispetto al TM5 ,ma non era facile capire se la posizione più critica fosse quella in verticale o orizzontale.

Arrivati a questo punto sono stati illustrati i risultati dell'analisi sia statica che dinamica all'interno di Joytek e si è deciso di puntare sul TM12 in quanto permette una maggiore estensione del braccio e maggior carico,anche pur pagando una maggiore complessità progettuale in quanto il sistema non è stabile staticamente e non lo sarà nemmeno dinamicamente. Per tanto d'ora in avanti si terrà in considerazione solo questa soluzione.

Per quanto riguarda il TM12 già in figura 8.5 si era evinto la mancanza di stabilità dal punto di vista statico, infatti il baricentro totale dell'intero sistema cadeva in alcuni casi proprio al limite dell'impronta verde delimitata dalle 6 ruote dell'AMR.

10.1 Studio di un eventuale ribaltamento

Scopo di questo capitolo è quello di capire vedendo i risultati ottenuti in dinamica, di quanto è necessaria allargare l'impronta con dei sistemi ausiliari per fare in modo che il tutto non si ribalti.

La strategia di calcolo usata è quella di ricondurre il caso in cui ci sono momenti e forze sul TM al caso statico, cercando quindi di calcolare dove si posiziona il baricentro nel caso dinamico. Nel dettaglio si vuole ricondurre la differenza di momenti che si scaricano al telaio tra il caso statico e quello dinamico, a uno spostamento del baricentro: esso allontanandosi dal centro del robot produrrà un maggiore momento al telaio. Conoscendo questa differenza di momenti si saprà di quando si deve allontanare il baricentro e quindi si verificherà se rientra o no nell'impronta.

Con le formule seguenti verrà spiegato nel maggior dettaglio il ragionamento logico che si è appena spiegato.

$$D\vec{M} = \vec{M_{tel}} - \vec{M_{tot}} \tag{10.1}$$

dove con $\vec{M_{tel}}$ si indica il momento che si scarica sul telaio nel caso in cui si applica la massima coppia sul secondo giunto, mentre con $\vec{M_{tot}}$ si intende il momento che si scarica sul telaio nel caso in cui il braccio sia fermo in verticale. Ovviamente il $\vec{M_{tel}}$ è sicuramente più grande perché oltre a garantire la componente statica a questa si deve aggiungere i momenti che si scaricano per la coppia impressa sul secondo giunto.

Questo valore di $D\vec{M}$ è la base per calcolarsi poi lo spostamento del baricentro. Il $D\vec{M}$ è dato dalla presenza della coppia, ma in linea teorica si può assumere che esso sia dato da uno spostamento del baricentro, non cambierebbe nulla , sempre che su quel telaio si scaricherebbe quel $\vec{M_{tel}}$, ora che sia dato dalla presenza di una coppia e dell'inerzia o dalla solo statica poco conta. Si vuole pertanto capire dove si va a posizionare il nuovo baricentro in grado di provocare staticamente quel $\vec{M_{tel}}$ e di fatto poi verificare la stabilità del sistema.

Per fare ciò è stato implementato uno script Matlab apposito. Si lavorerà in questa parte con il sistema di riferimento fissato sulla piastra dell'AMR a 60 mm verso il dietro del robot mobile e sulla linea di mezzeria longitudinale. Asse Y è orientato verso il dietro sulla linea di mezzeria longitudinale e asse Z perpendicolare alla piastra e verso l'alto, azze X che completa la terna destrorsa.

Nel primo script si esamina la posizione del TM12 in verticale e con l'asse del 2° giunto orientato nello stesso verso dell'asse X. Si calcola il baricentro totale del sistema robot+carico in quella posizione, facendo cura a esprimere tutte le coordinate dei vari baricentri in quel sistema di riferimento. Il valore che si ottiene è il seguente:

$$\vec{P_{Grobot}} = \begin{pmatrix} 180.31 \\ 0 \\ 818.14 \end{pmatrix} mm \tag{10.2}$$

è ovvio che esso abbia coordinata Y pari a zero poiché è simmetrico rispetto al piano X-Z.

Successivamente si calcola al livello statico il momento che questo braccio robotico esercita sul telaio. Esso è dato dalla somma vettoriale di tutti i momenti prodotti dalle singole forze peso dei vari componenti del robot.

$$\vec{M_{stat}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 73.58 \\ 0 \end{pmatrix} Nm \tag{10.3}$$

Il momento che si scarica a telaio dovuto alla dinamica che si è calcolato nel capitolo precedente è pari a

$$\vec{M_{tel}} = \begin{pmatrix} 311 \\ 94.98 \\ 40.80 \end{pmatrix} Nm \tag{10.4}$$

Ovviamente è lo stesso riportato nell'equazione (9.8) ma ha le componenti ordinate in modo diverso e segno diverso poiché è stata applicata la matrice di rotazione per portarlo dal vecchio sistema di riferimento al nuovo sopra citato.

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10.5}$$

A questo punto si calcola il $D\vec{M}$ con (10.1), esso è pari a:

$$D\vec{M} = \begin{pmatrix} 311 \\ 21.39 \\ 40.80 \end{pmatrix} Nm \tag{10.6}$$

Calcolato il valore di $D\vec{M}$ si può calcolare di quanto si debba spostare il baricentro. Si calcola il nuovo baricentro del sistema robot+carico come:

$$\begin{pmatrix} P_{GX}new \\ P_{GY}new \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{GrobotX} + DM_y * 1000/[9.81 * 41.6] \\ P_{GrobotY} - DM_x * 1000/[9.81 * 41.6] \end{pmatrix} mm \tag{10.7}$$

Si effettua la moltiplicazione per 1000 per passare da m a mm e la divisione per 41.6*9.81 che sarebbero i N della forza peso, per dividere il DM per il modulo della forza peso in modo tale che si ha il braccio del momento che poi si va a sommare o sottrarre al vecchio baricentro del robot per essere coerenti con il sistema di riferimento.

Poi ovviamente si calcola il baricentro complessivo conoscendo il nuovo $\vec{P_{Grobot}}$ con la sua massa e i baricentri dell'AMR, piastra, controller e loro masse usando la classica formula
$\vec{P_Gtot} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{P_G i} * m_i}{1}$.
Si ottiene il valore di:

$$\begin{pmatrix} P_{GX}tot \\ P_{GY}tot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.75 \\ -237.25 \end{pmatrix} mm \tag{10.8}$$

La componente Z non è importante poiché non influisce sull'impronta del baricentro a terra.

Se si mantiene tale configurazione, ma si cambia il verso della rotazione, ovviamente si cambia il verso del $Mtel_X = -311Nm$ si avrà:

$$\begin{pmatrix} P_{GX}tot \\ P_{GY}tot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.75 \\ 237.25 \end{pmatrix} mm \tag{10.9}$$

Facendo fare al braccio una rotazione di 90° al primo giunto quindi ponendo l'asse del 2° giunto orientato secondo l'asse Y del sistema di riferimento, si può valutare il ribaltamento in questo

secondo caso. Si svolge la stessa procedura e si ottengono come valori gli analoghi del primo caso ma ovviamente con le coordinate X e Y invertite.

$Mtel_Y = +311Nm$ si avrà:

$$\begin{pmatrix} P_{GX}tot \\ P_{GY}tot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 237.25 \\ 16.75 \end{pmatrix} mm \tag{10.10}$$

$Mtel_Y = -311Nm$ si avrà:

$$\begin{pmatrix} P_{GX}tot \\ P_{GY}tot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -237.25 \\ 16.75 \end{pmatrix} mm \tag{10.11}$$

Come era facilmente intuibile essendo il problema assial-simmetrico nelle 4 configurazioni appena analizzate:

- Asse secondo giunto orientato secondo l'asse X:
  - Rotazione robot positiva concorde con +X
  - Rotazione robot negativa concorde con -X
- Asse secondo giunto orientato secondo l'asse Y:
  - Rotazione robot positiva concorde con +Y
  - Rotazione robot negativa concorde con -Y

i valori di posizione di baricentro che si ottengono sono sempre quelli ma si scambiano le coordinate e i segni ottenendo tutte e 4 le possibili configurazioni.

É facile immaginare quindi che anche quando il 1° giunto non fa una rotazione di 90° posizionando il secondo giunto o sull'asse Y o X il baricentro totale si trovi sulla circonferenza avente raggio pari a:

$$R = \sqrt{16.75^2 + 237.25^2} = 237.78 \tag{10.12}$$

e centrata nell'origine del sistema di riferimento.

Si può valutare a questo punto se tale circonferenza rientra nell'impronta verde delimitata dalle ruote di 8.5.

Per fare ciò si è plottato tramite MatLab l'impronta verde delle ruote, la piastra dell'AMR in magenta e la circonferenza del nuovo baricentro tenuto conto degli effetti dinamici in rosso.

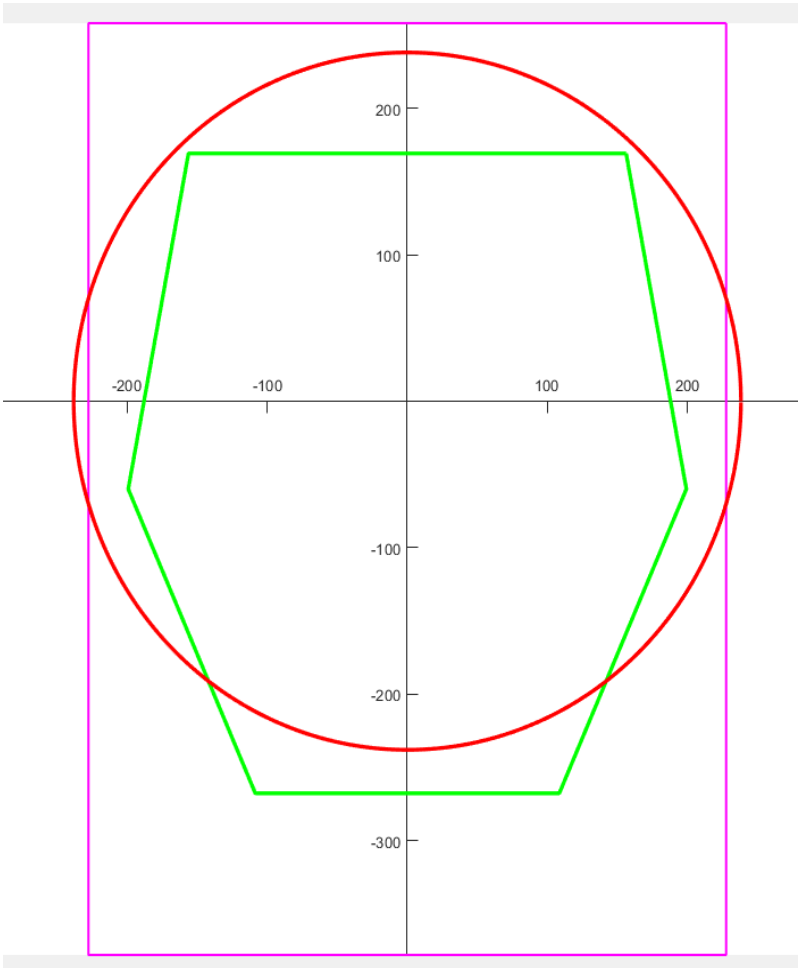


Figura 10.1: Pianta in cui si mostra la circonferenza dove si va a posizionare il nuovo baricentro

Come si può notare il baricentro esce abbondantemente dall'impronta delle ruote in parecchi casi. Ciò comporta un inevitabile ribaltamento dell'intero sistema e pertanto si è pensato di risolvere tale problema allargando l'impronta dell'AMR quando esso è fermo e sopra il TM si muove. Si vedrà nei prossimi capitoli la soluzione adottata.

Ovviamente tale studio è fatto per la sola configurazione verticale che è sembrata essere la più critica ma ciò non esclude che ci possono essere altre configurazioni ancora più critiche in cui si scaricano a telaio coppie maggiori.

10.2 Studio di un eventuale strisciamento

Per quanto riguarda lo strisciamento come si può notare nei risultati dell'equazione (9.11) le forze in direzione X e Y che provocano strisciamento sono basse, anche il momento torcente M_z non è alto, stiamo attorno ai 40 Nm, tuttavia ovviamente il caso più preoccupante per uno strisciamento è quello in cui viene data massima coppia al primo giunto, in tal caso si scaricherebbe sul telaio un momento torcente di 311 Nm.

Ipotizzando che sopra all'AMR fra robot, controller, piastra, eventuali sistemi di stabilimento e colonnina ci siano al incirca 90 Kg (ipotesi più che realistica) e inoltre in aggiunta i 12 KG di carico del robot e i 62 Kg dell'AMR in totale sul pavimento si scaricano 164 Kg. Ipotizzando anche che la forza che si oppone allo strisciamento avviene prevalentemente sulle due ruote motrici e che il loro braccio è di 0.208 metri dalla posizione del TM si ha che su ogni ruota si scarica una forza tangenziale che si oppone alla rotazione imposta dal momento torcente di:

$$M_t = 311Nm = 2T * 0.208 \rightarrow T = 311/2/0.208 = 747.59N \tag{10.13}$$

A un peso di 164 Kg corrisponde una reazione normale pari a 1589.22 N che divisa sulle due ruote darebbe un valore di 794.31 N. Ovviamente si ha $\mu_{statico} = \frac{747.59}{794.31} = 0.94$ un valore troppo alto che sicuramente non si avrà nell'attrito gomma-pavimento.

In questo breve trattazione per lo slittamento sono state fatte tante approssimazioni, a partire dalla due ruote motrici che assorbono solo loro la forza normale e quella tangenziale, ipotesi non veritiera poiché ci sono in totale 6 ruote e altri appoggi esterni per garantire l'equilibrio, quindi il sistema è altamente iperstatico e non si riesce a sapere come si ripartisce le forze tangenziali e quelle normali a meno che non si usino software appositi.

Tuttavia già con queste notevoli semplificazioni ottenendo un valore così alto di $\mu_{statico}$ si può evincere che forse si dovrà imporre delle limitazioni alla massima coppia applicabile sul primo giunto a livello si software per evitare uno strisciamento del momento torcente.

Capitolo 11

Progettazione del sistema per Joytek

Una volta compreso di quanto debba essere allargata l'impronta per rendere il sistema stabile, aver trattato le specifiche che deve avere il sistema AMR+COBOT per permettere una corretta integrazione, aver discusso delle potenzialità di queste nuove tecnologie e aver compreso le caratteristiche tecniche dei prodotti che si andranno a sfruttare si può iniziare lo sviluppo dettagliato del progetto.

Si è visto nel capitolo precedente che è necessario avere come impronta almeno una circonferenza di raggio 237 mm centrata nell'origine del robot per garantire stabilità al sistema. In realtà dovrebbe essere più piccola in quanto in quel calcolo non è stata considerata la massa di un'eventuale colonna di sollevamento (non è stata considerata perché il cliente finale potrebbe decidere di ometterla).

Applicando un fattore di sicurezza di almeno 1.6 si è deciso di fare un impronta rettangolare che sia almeno 800mm x 800mm. Ovviamente si è pensato di raggiungere tale ampiezza con dei cinematismi richiudibili, nello specifico, uno per ogni vertice del rettangolo che si aprissero e toccassero terra quando l'AMR è fermo e il cobot deve iniziare a muoversi e si chiudessero quando l'AMR deve ripartire.

A questo punto si apre un punto cruciale da tenere in considerazione per la progettazione di questi cinematismi: quando l'AMR è in movimento e i cinematismi chiusi, essi non devono in nessuno modo interferire con i sensori di orientamento dell'AMR che sono i due laser scanner anteriori e i 4 rear sonar posteriori, altrimenti l'AMR non partirebbe.
Si deve fare in modo pertanto che essi rimangano o totalmente al di sopra della piastra, oppure che non invadano il campo di funzionamento dei sensori quando sono chiusi. Nella parte posteriore, al di sotto della piastra, quindi non può esserci nulla e nella parte anteriore solamente se quando il cinematismo è chiuso rimane a un altezza superiore da terra di 225 mm (che è fin dove funzionano i laser scanner).

Per realizzare questa impronta si è deciso di allargare di 800 mm, nel lato corto dell'AMR, creando proprio una piastra che fungesse da top-plate dell'AMR di quella larghezza e poi nel lato lungo creando una piastra delle dimensioni minime affinché riesca a contenere tutti i componenti necessari e poi si andrà a ampliare ulteriormente l'impronta sfruttando l'apertura del cinematismo.

Si è deciso di adottare questa scelta poiché non era possibile posizionare un cinematismo con apertura lungo la diagonale del rettangolo a causa dello scarso spazio a disposizione; per fare ciò infatti si sarebbe dovuto creare una piastra molto più grande del perimetro dell'AMR non solo in un lato bensì in due, costruendo cosi una soluzione più pesante e più ingombrante.

La piastra deve essere fatta con gli opportuni fori passanti per delle viti e testa cilindrica a esagono incassato che si andranno a avvitare sul telaio e fisseranno la piastra all'AMR. Le posizioni di questi fori sono stati prese dai dati Omron, nello specifico occorrono 3 viti per ogni lato lungo e due per ogni lato corto.
La piastra è di alluminio e si ricava partendo da uno strato di materiale spesso 15 mm al quale nella parte che sporge al di fuori dell'AMR viene portato via materiale per risparmiare peso e la si porta a 11 mm di spessore. Nella parte interna delle viti di fissaggio si riduce anche spessore facendo uno scavo di 5 mm di profondità. La piastra deve essere spessa almeno 11 mm nella parte sporgente altrimenti non è assicurata la tenuta a flessione quando agiscono i carichi. Eventualmente nella parte superiore possono essere applicate delle costolature di rinforzo della piastra.
Alla fine di questo capitolo viene riportato il disegno 3D della piastra.

Si va avanti con la trattazione e si lascia in sospeso momentaneamente la descrizione della piastra poiché andando avanti verranno introdotti dei vincoli da tenere conto per il dimensionamento di essa.

11.1 Cinematismo di apertura e chiusura degli appoggi a terra

In questa sezione si andrà a descrivere la soluzione pensata per far sì che quando l'AMR è fermo abbia dei sistemi di appoggio a terra ausiliari che permettano di allargare l'impronta.

Si è cercata una soluzione che quando il meccanismo fosse chiuso risultasse la più compatta possibile e piacevole anche a livello estetico. Si è optato quindi per un qualcosa che una volta chiuso rimanesse tutto al di sotto della piastra ma sopra al laser scanner in modo tale che poi può essere coperto tramite una carterizzazione. Ovviamente il meccanismo quando si apre deve cercare di sbracciare il più possibile per allargare ulteriormente l'impronta lungo il lato lungo dell'AMR.

Si è pensato a un sistema che ricalcasse il meccanismo di apertura del carrello degli aerei, in letteratura ci sono molte soluzioni di tale genere, sono molto compatte ma sono state scartate in quanto non permettono uno sbraccio.
Quindi si è ragionato su un meccanismo nuovo che fosse compatto e al tempo stesso consentisse quando si apre un buono sbraccio. Si riporta lo sketch della soluzione trovata qui sotto:

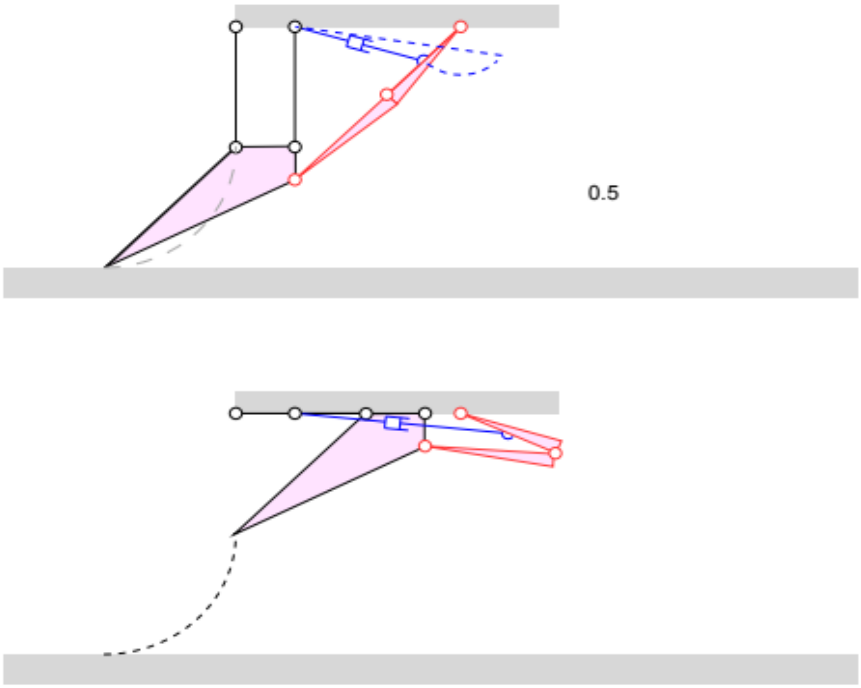


Figura 11.1: Sketch del meccanismo ideato

Per il problema in questione non avendo molto spazio per inserire un attuatore lineare come in figura, si è pensato di sostituirlo con un attuatore rotazionale, in tal modo facendo ruotare la prima asta in rosso che funge da , si avrà la rotazione dell'intero meccanismo. Come si evince facilmente dal disegno questo meccanismo ha un solo grado di libertà e giace su un piano: conoscendo l'angolo di manovella che di seguito si indica con α si conosceranno tutti gli altri angoli e la posizione esatta di ogni singolo componente.

Si riporta uno sketch semplificato con le modifiche appena descritte sopra e le indicazioni degli angoli e le denominazioni delle lunghezze.

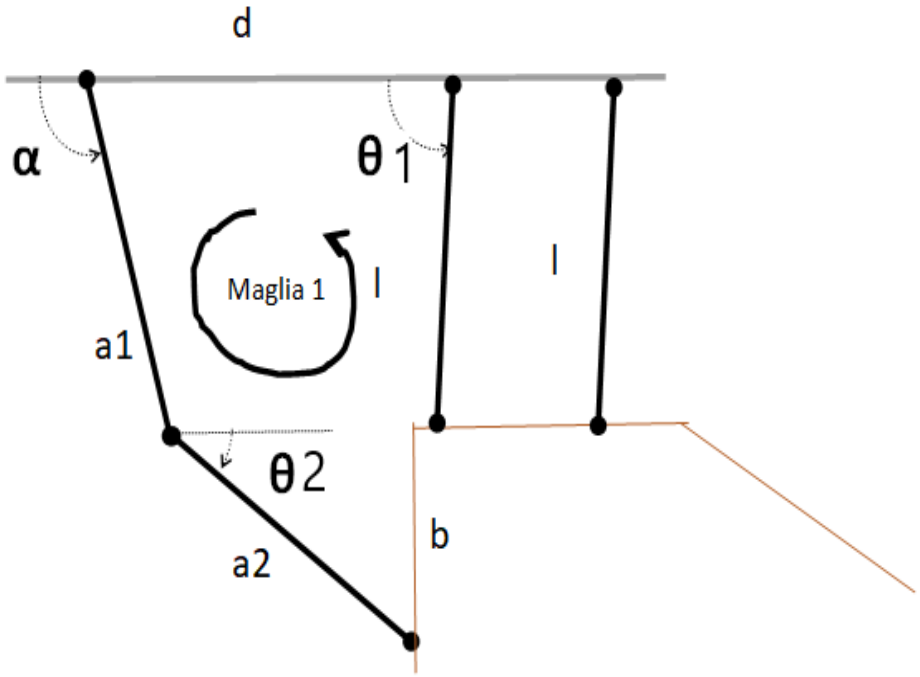


Figura 11.2: Sketch del meccanismo adottato nella progettazione

Si vuol procedere al dimensionamento del meccanismo, in modo da attribuire dei valori alle lunghezze nominate in figura 11.2 e dei range di movimento dell'angolo α di apertura del manovellismo.

Prima però si ricorda che nel dimensionamento si è dovuto tener conto dei seguenti vincoli:

- Tutto il cinematismo una volta chiuso non deve interferire con i sensori di movimento dell'AMR
- Il cinematismo chiuso deve sottostare al disotto della piastra a meno di qualche parte che potrebbe fuoriuscire al di sopra.
- Vanno posti due cinematismi per lato lungo: uno che si apre verso l'anteriore dell'AMR e uno verso il posteriore. Essi non devono interferire tra di loro e occupare il minimo spazio in senso longitudinale una volta richiusi così che la piastra sia non molto lunga.
- Il cinematismo deve consentire uno sbraccio a sufficienza tale che si raggiunga un'impronta di almeno 800 mm nel lato lungo dell'AMR.

Per le lunghezze geometriche delle varie componenti sono stati fatti diversi tentativi su SolidEdge provando diverse dimensioni e vedendo l'ingombro massimo che dava il meccanismo sia da chiuso che in fase di apertura e alla fine la soluzione ottima raggiunta è la seguente:

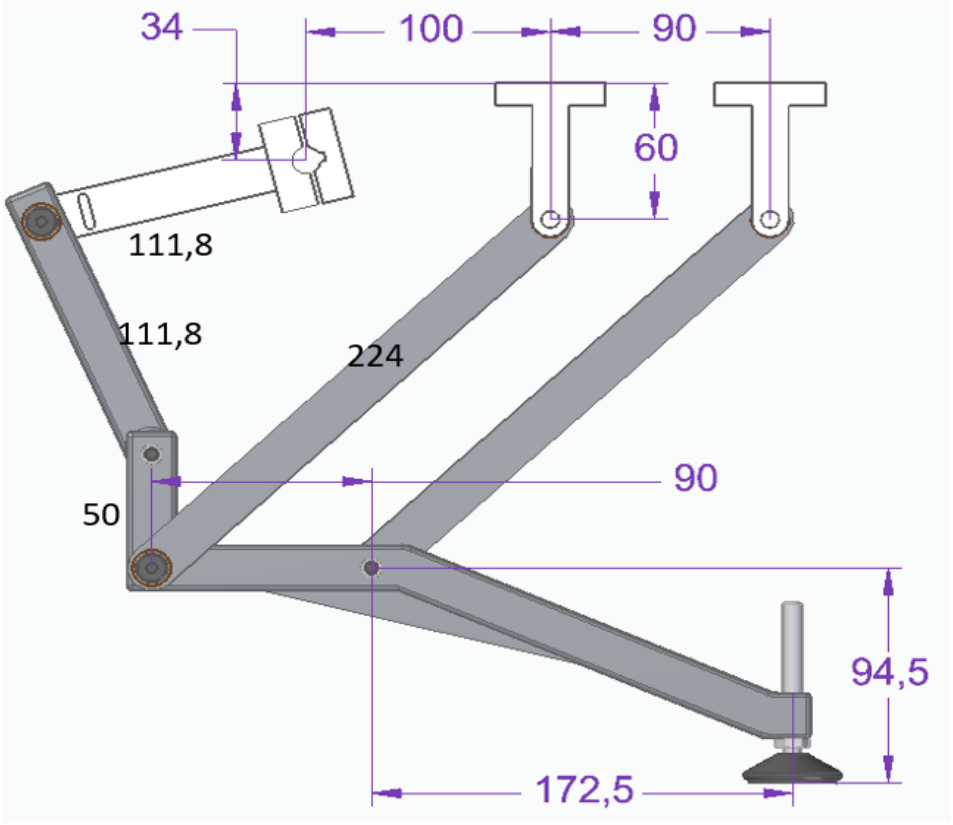


Figura 11.3: Meccanismo dimensionato in SolidEdge con le relative dimensioni

Le dimensioni sono riportate nella figura sovrastante.
Da notare che il segmento denominato "b" nella figura 11.2 nella soluzione definitiva ha un orientamento verso l'alto e non più verso il basso (la biella "a2" si incerniera in alto e non in basso).

11.1.1 Cinematica diretta

Si vuole risolvere ora la cinematica diretta di tale meccanismo in modo tale che in base al angolo indipendente α si conoscono tutti gli altri angoli.

Per far ciò si risolve la cinematica sfruttando l'equazione di chiusura con le maglie (facendo riferimento alla figura 11.3). In questo caso avendo il sistema un grado di libertà basterà una singola maglia e si conoscerà le due incognite θ_1 e θ_2. (Le due aste a destra rimangono sempre parallele poiché il piedino rosso nel suo movimento non ruota ma trasla solamente).

$$\begin{cases} a1 * cos(\alpha) + d - a2 * cos(\theta_1) - l * cos(\theta_2) = 0 \\ +34 + a1 * sin(\alpha) + a2 * sin(\theta_1) + b - l * sin(\theta_2) - 60 = 0 \end{cases}$$

Le equazioni non sono risolvibili manualmente pertanto è stato implementato un codice Matlab che le risolvesse. Nel particolare è stata fatta una function apposita che avesse in input l'angolo α e come output gli angoli θ_1 e θ_2 una volta note le misure dimensionali geometriche. Inoltre, visto che il sistema sopra riportato ha due soluzioni di θ_1 e due di θ_2 per ogni angolo α,dopo avere trovato i 4 angoli soluzioni, è stato implementato un breve if che permettesse di selezionare le due soluzioni coerenti con il meccanismo.

Questa function viene poi inserita nel programma principale dove tramite un for vengono dati in input tutti gli angoli α che vanno da -70° a 120° con step di 5° e per ogni angolo viene risolta la function e si ottiene quindi in uscita gli angoli incogniti per ogni valore di α. E' stato scelto $-70° \rightarrow 120°$ come intervallo poiché si è visto modellando il meccanismo con SolidEdge che all'incirca fosse quello il range di azione della manovella (per la precisione è -66.5° +116.4°)

Si salva in un file variabili Matlab le variabili ricavate ovvero α, θ_1 e θ_2. Tale file poi verrà caricato in un altro script inerente la statica del meccanismo.
Infatti per la scelta dell'attuatore rotativo che occorre per movimentare la manovella si deve sapere la coppia che deve esercitare nell'apertura e chiusura.

11.1.2 Statica cinematismo

Per sapere la coppia massima che deve esercitare il motore si risolve solamente la statica del meccanismo senza la dinamica poiché i movimenti sono molto lenti e non ci sono inerzie in gioco.

Le uniche forze esterne in gioco sono le forze peso, è quindi necessario sapere le masse di ogni singolo componente del cinematismo. Ovviamente ciò dipende dallo spessore delle aste oltre che dal materiale. Esse sono tutte quante spesse 10 mm e larghe 20 mm. Tutti i componenti sono di acciaio.

Si spiegheranno più avanti le motivazioni di tali scelte. Considerando i fori e la geometria esatta di esse, dal CAD si ottiene che il loro peso è:

- Manovella acciaio:0.23 Kg
- Biella acciaio:0.35 Kg
- Asta acciaio:0.21 Kg
- Piede in acciao:0.82 Kg

ovviamente non contano le masse degli appoggio costruiti per incernierare il tutto poi sulla piastra.

Si riporta nell'immagine sottostante le reazioni vincolari incognite, il momento rosso è il momento che deve esercitare il motore per sorreggere la struttura durante l'apertura. Se esso non ci fosse si avrebbe il collasso della struttura che raggiungerebbe la posizione di equilibrio stabile, ovvero il meccanismo aperto.

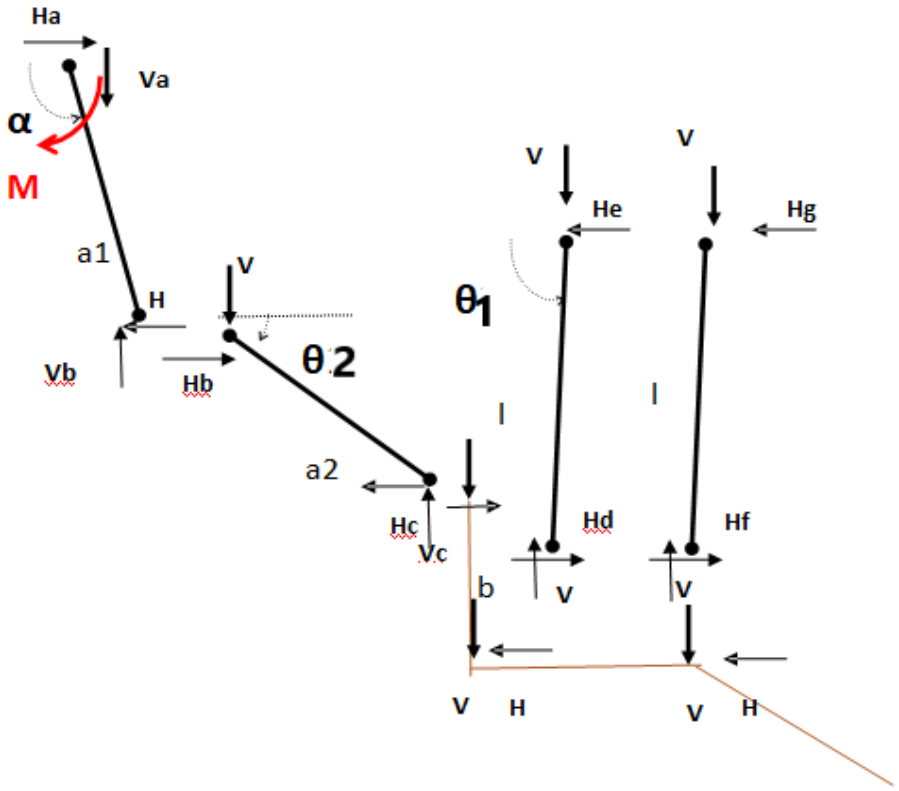


Figura 11.4: Reazioni vincolari incognite da trovare

Per trovare queste reazioni si scrivono le tre reazioni di equilibrio per ogni corpo:

- Equilibrio verticale
- Equilibrio orizzontale
- Equilibrio rotazionale

Si ottiene quindi 15 equazioni in 15 incognite che vengono riportate qui sotto:

$$\begin{cases} H_a - H_b = 0 \\ V_b - V_a - m(1) * 9.81 = 0 \\ -M + m(1) * 9.81 * cos(\alpha) * a1/2 - V_b * a1 * cos(\alpha) - H_b * a1 * sin(\alpha) = 0 \\ H_b - H_c = 0 \\ V_c - V_b - m(2) * 9.81 = 0 \\ V_c * a2 * cos(\theta_2) - m(2) * 9.81 * a2/2 * cos(\theta_2) - H_c * a2 * sin(\theta_2) = 0 \\ H_c - H_d - H_f = 0 \\ -V_c - m(3) * 9.81 - V_d - V_f = 0 \\ -m(3) * 9.81 * h/2 - Hc * b - Vf * h = 0 \\ -H_e + H_d = 0 \\ V_d - m(4) * 9.81 - V_e = 0 \\ m(4) * 9.81 * l/2 * cos(\theta_1) - V_d * l * cos(\theta_1) + H_d * l * sin(\theta_1) = 0 \\ -H_g + H_f = 0 \\ V_f - m(4) * 9.81 - V_g = 0 \\ m(4) * 9.81 * l/2 * cos(\theta_1) - V_f * l * cos(\theta_1) + H_f * l * sin(\theta_1) = 0 \end{cases}$$

Le masse sono:

- $m(1)$=massa manovella
- $m(2)$=massa biella
- $m(3)$=massa piede
- $m(4)$=massa asta

Il risultato che interessa è quello del momento: esso passa dal valore massimo di 2.35 Nm nella posizione in cui il meccanismo è retratto al valore di poco inferiore allo 0 (-0.15) nel valori di 120° di α.

Ovviamente ciò è coerente con i risultati attesi, infatti quando esso è aperto il sistema è in equilibrio da solo e non occorre un momento esterno che sorregga il tutto, mentre assume valore massimo quando è totalmente chiuso in quanto si deve sorreggere il peso dell'intero meccanismo.

Noto questo valore di coppia massima richiesta si può procedere alla scelta dell'attuatore.

11.1.3 Scelta dell'attuatore rotativo

Come attuatore rotativo ci si è fin da subito orientati su un piccolo motore con riduttore a vite senza fine. Si è andati su questa scelta per l'irreversibilità della vite senza fine, infatti quando il motore viene scollegato, il meccanismo rimarrà fermo e non si aprirà anche senza la mancanza

di sistemi di ritenuta proprio grazie a questa irreversibilità. Ciò consente di scollegare il motore quando non deve ruotare, risparmiando sulla batteria dell'AMR e evitando la rottura dello stesso.

Una cosa di fondamentale importanza è il fatto che quando si apre il meccanismo, la manovella vada qualche grado oltre la posizione di perfetto allineamento con la biella, ciò di fatto consente di uscire dalla posizione di equilibrio instabile biella/manovella e fa si che agendo una forza normale verso l'alto sul piedino, il meccanismo continui a richiudersi continuando la rotazione nel senso di apertura. Tale chiusura come si vedrà nella sezione successiva verrà bloccata con un blocco meccanico che di fatto impedisce al meccanismo di richiudersi e non si va a gravare sulla vite senza fine bensì sul fermo meccanico. Per la chiusura del meccanismo si deve attuare il motore nel senso inverso di apertura.

Questa soluzione permette di supportare qualsiasi forza normale che spingerebbe il piedino verso l'alto, senza che l'appoggio si richiuda e quindi venga meno la stabilità dell'AMR. E'stata verificata anche tramite matlab il fatto che applicando una forza normale verso l'alto sull'estremità del piedino la biella agirebbe come puntone e quindi mettendo questo blocco si evita la chiusura del sistema.

Riguardo al motore dopo una approfondita ricerca in letteratura e tra i vari fornitori di questa soluzione, la scelta è ricaduta sull'azienda INTECNO e sul suo modello CM-26-60-U-BL012.240

Caratteristiche micro motoriduttore:

- Tipo CM - Micro motoriduttori a vite senza fine
- Taglia 026
- Rapporto (i=) 60
- Velocità in entrata [rpm] 4000
- Velocità in uscita [rpm] 67
- Coppia nominale [Nm] 9
- Coppia di picco [Nm] 9
- Coppia in uscita nominale [Nm] 4
- Rendimento 0.6
- Peso [kg] 0.8

Caratteristiche motore:

- Designazione BL012.240
- Tipo Brushless
- Potenza [W] 52.5
- Poli 8
- Coppia [Nm] 0.13
- Coppia massima [Nm] 0.25
- Tensione [V] 24
- Corrente nominale [A] 3.5
- Numero di fasi 3
- Resistenza [Ω] 2.8
- Induttanza [mH] 1.2
- Peso [Kg] 0.45

La coppia nominale di 4.5 Nm è di molto superiore a quella richiesta e riesce a vincere ampiamente anche tutti gli attriti presenti nel cinematismo. E' stato scelto tale motore per la velocità più bassa

in uscita che c'è a disposizione, infatti 67 rpm sono fin troppi ma, contattando il fornitore, si è stati informati che tramite l'azionamento che comanda il brushless si può abbassare anche questa velocità e di fatto si può comandare in qualsiasi modo si voglia il motore. E'stata scelta questa soluzione nonostante la vite non giri in continuazione poiché il costruttore ha riferito che sono motori adatti anche a questo tipo di lavoro ciclico e per brevi frazioni di giro. L'arresto del motore viene controllato sempre tramite l'azionamento che quando sente un overload dovuto alla battuta meccanica della manovella interrompe il funzionamento del motore. L'input elettrico è compatibile con le uscite elettrice presenti nel LDcore come descritto nel capitolo 5.

Si riporta l'immagine del motore:

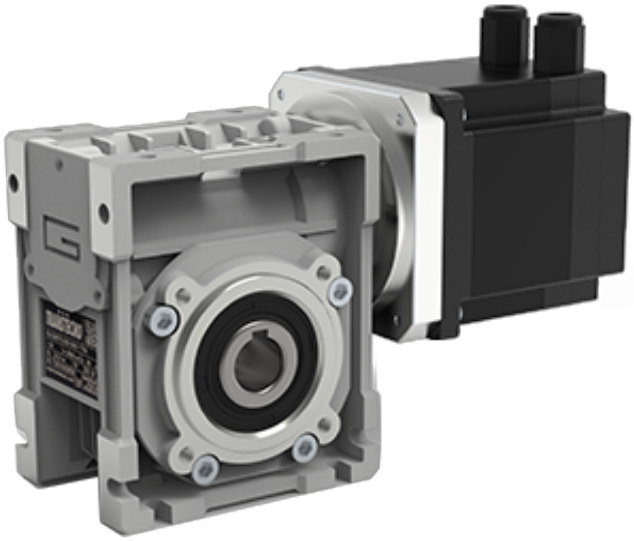


Figura 11.5: Esempio di motoriduttore a vite senza fine con motore brushless INTECNO

Per l'applicazione sono necessari 2 motori con albero di uscita con linguetta sulla sinistra e due riduttori con albero sulla destra.

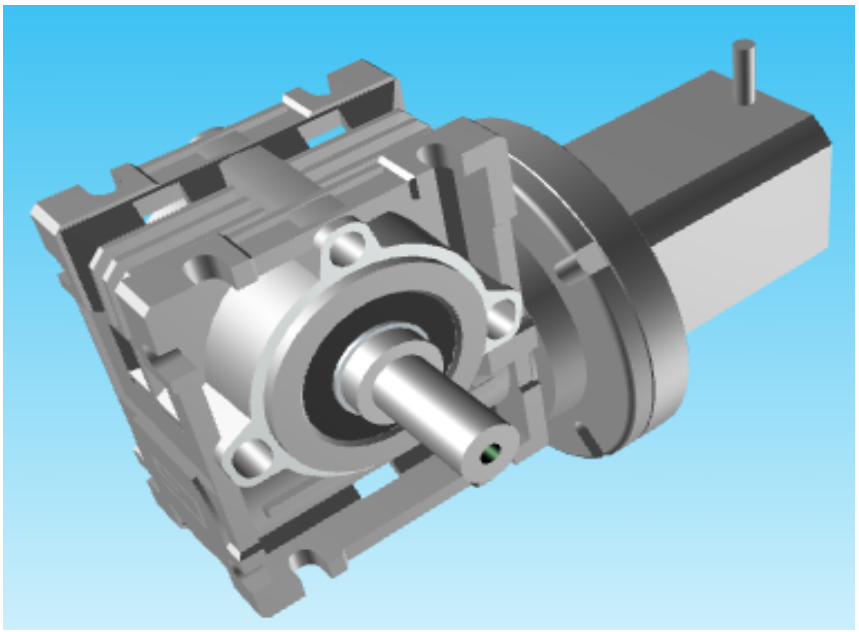


Figura 11.6: Motoriduttore INTECNO CM-26-60-U-BL012.240

Per le dimensioni e le caratteristiche più dettagliate si rimanda al sito ufficiale del prodotto:
`https://www.micro-intecno.com/catalog-element/micro-motoriduttori-brushless-vite/`

11.1.4 Incernieramento delle aste

Le aste e il piedino occorre che siano incernierati tra di loro per bloccare tutti i gradi di libertà e lasciarne solo uno libero: quello della rotazione relativa tra i corpi.

Inoltre è necessario che le aste quando si richiudono non facciano interferenza a vicenda, ma che tutto il meccanismo si richiude compatto. Per far ciò è necessario porre le aste che si incontrano nella chiusura su piani paralleli ma sfalsati.

È stata ideata come soluzione quella di usare come perni su cui incernierare due aste le viti a colletto ISO-7379 che hanno il gambo rettificato e solamente la parte finale filettata dove si andrà a inserire un dado per non fare sfilare la vite.

Sono state scelte i modelli dell'azienda "Elesa" con lunghezza della parte rettificata 25, 30, 35 e 40 con tolleranza +0.25 (dipende a seconda di dove si andrà a inserire la vite) e diametro 8 mm tolleranza f9. Il diametro di 8 mm è dato dal diametro interno della boccole in bronzo che si sono scelte, le si tratterà più avanti.

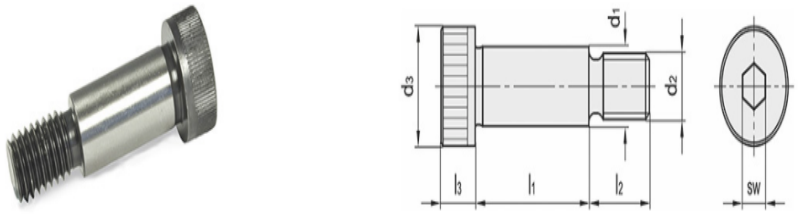


Figura 11.7: Viti ISO 7379

Questa soluzione permette di regolare il gioco assiale grazie al dado che va a serrare la cerniera assialmente, infatti si deve fare in modo che non ci sia troppo gioco altrimenti il meccanismo oscilla, ma nemmeno troppo poco altrimenti viene impedita la rotazione reciproca delle due aste.

Per evitare il contatto acciaio-acciaio sono state posizionate delle boccole flangiate in bronzo sinterizzato della "SKF" di diametro esterno 12 mm e interno 8 mm, diametro flangia 16 mm, spessore flangia 2 mm e lunghezza di 12 mm.

Queste boccole autolubrificanti ed esenti da manutenzione sono composte da una matrice in bronzo porosa impregnata di lubrificante. L'impregnamento a base di olio consente velocità di strisciamento molto elevate e rende queste boccole idonee per le applicazioni con movimenti rotatori.

Vengono riportate le caratteristiche di queste boccole:

- Materiale: Matrice in bronzo metallico sinterizzato e grafite (1% del peso di grafite), con porosità completamente impregnate; la composizione del materiale di queste boccole è SINT A51 con un volume di porosità del 28%, impregnato di olio minerale
- Gamma di temperature di esercizio ammissibili da -10 a +90 °C (da +15 a +195 °F)
- Carico ammissibile: dinamico: $10N/mm^2$, statico: $20N/mm^2$
- Velocità di strisciamento ammissibile da 0,25 a 5,0 m/s (da 0,8 a 16,4 piedi/s)
- Coefficiente di attrito μ da 0,05 a 0,10 (ingrassata)

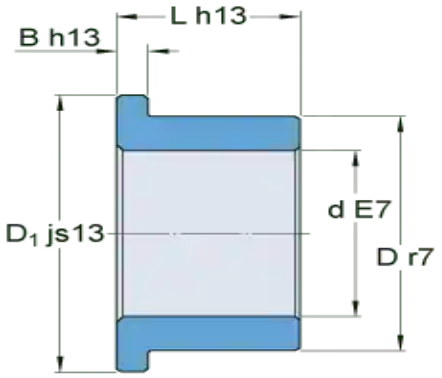


Figura 11.8: Tolleranze boccole

Per l'alloggiamento della boccola si devono rispettare le seguenti tolleranze:

- Tolleranze per l'albero da f7 a f8
- Tolleranza per l'alloggiamento H7
- Ruvidezza albero Ra: da 0,2 a 0,8 µm
- Durezza albero da 200 a 300 HB

L'entità del carico specifico sullo snodo si può calcolare con la formula $p = F/A$ dove [19]:

- p carico specifico sul cuscinetto [N/mm2]
- F carico sul cuscinetto [N]
- A sezione trasversale di carico [mm2]
  - d (B - 2) per boccole a filamenti avvolti
  - d B per boccole in bronzo e poliammide
  - ((D/2) - (d/2))2 π per ralle reggispinta

Se il movimento è costante, la velocità media di strisciamento si può calcolare con la formula $v = 5,82 * 10^{-7} d\beta f$
dove

- v velocità di strisciamento, [m/s]
- d diametro di strisciamento [mm]
  - diametro foro d per boccole
  - 0,5 (d + D1) per la flangia di boccole che ne sono provviste
  - 0,5 (d + D) o dimensione Ja per ralle reggispinta

- f frequenza di oscillazione [min-1], o velocità rotazionale [giri/min]
- β semiangolo di oscillazione [gradi, °], per rotazione $\beta = 90°$

Le boccole flangiate servono per reggere il carico assiale ma in questo caso vengono usate solo per evitare lo strisciamento acciaio/acciaio tra le due aste.

Nel caso specifico le forze sono bassissime nel caso dinamico e più alte nel caso statico perché si scaricano sul piede delle forze di reazioni dal pavimento, ma anche ipotizzando una forza di spinta dal terreno di 800N verso l'alto si avrà che in alcune boccole la forza radiale sarà non elevatissima (ordine 2 kN) e comunque sia viene rispettato il carico statico di 20 N/mm2.

Le rotazioni quasi nulle con frequenze bassissime (il meccanismo si apre e si chiude non in continuazione) e quindi non destano preoccupazione per le boccole.

L'accoppiamento è con gioco tra boccola e perno e con interferenza tra boccola e foro sull'asta. Lo strisciamento avviene tra perno e boccola.

11.1.5 Sistema di blocco manovellismo

Come già accennato nella sottosezione 11.1.3 per impedire che il meccanismo una volta arrivato a terra e soggetto alle forze provenienti da terra si richiuda su se stesso e quindi facendo mancare all'AMR uno dei quattro appoggi fondamentali per garantire stabilità al robot, si è pensato di introdurre un blocco meccanico alla manovella. Ciò permette di non gravare solamente sull'irreversibilità della vite senza fine.

Per fare ciò si fa si che la manovella vada oltre di qualche grado e che poi si introduca un blocco meccanico.
La si spinge di pochi gradi oltre il perfetto allineamento biella-manovella per fare si che si esca dalla posizione di equilibrio instabile. Infatti, quando sono perfettamente allineate, comprimendo le due aste si potrebbe instaurare il fenomeno del "buckling", invece facendo perdere il perfetto allineamento questo non si verificherà e si saprà per certo dove le due aste proseguiranno la rotazione per richiudere il meccanismo. Noto il naturale movimento del meccanismo quando agiranno delle forze da terra e questo tenderà a richiudersi, si andrà a applicare un blocco meccanico per impedire tale movimento.

Si riporta nella figura sottostante il meccanismo di blocco pensato e si spiegherà successivamente come lo si è realizzato e di quanti gradi avviene lo sfasamento.

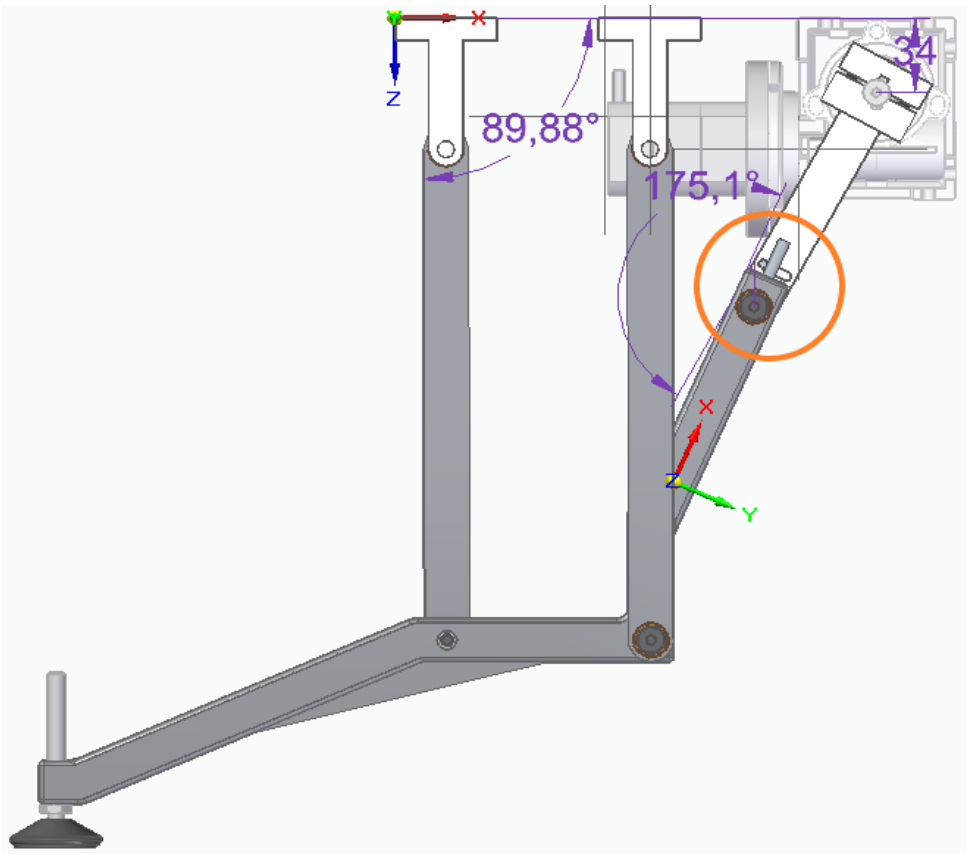
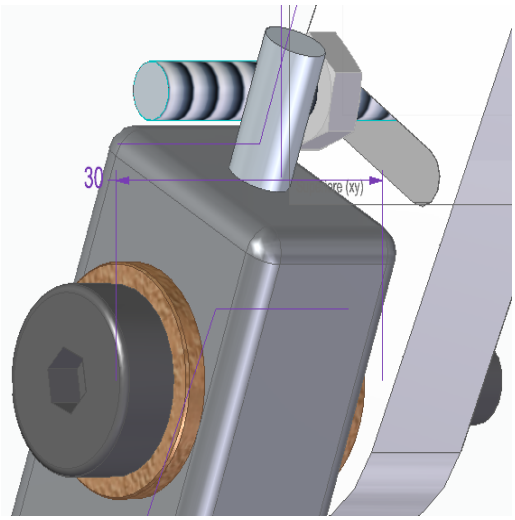
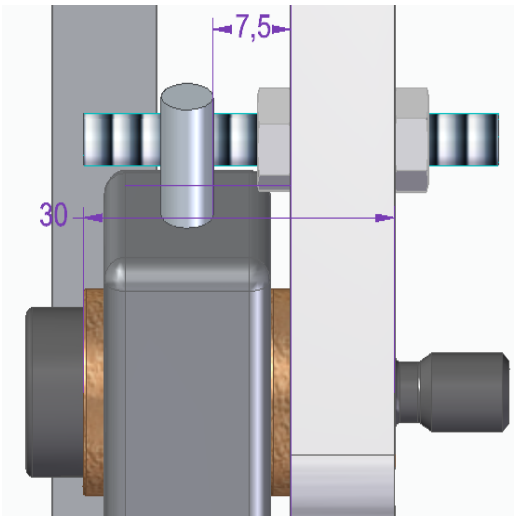


Figura 11.9: Meccanismo di blocco della rotazione con in evidenza il disallineamento tra manovella e biella

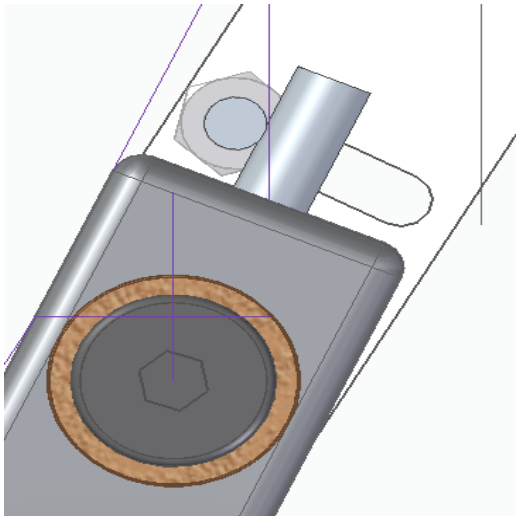
Come si può notare nell'immagine soprastante, la manovella si spinge oltre il prefetto allineamento di 4.9° (infatti l'angolo che si crea tra le due aste è di 175.1°), spostandosi quindi dalla posizione di equilibrio instabile. Cosi facendo se sul piedino agisse una forza verso l'alto che lo farebbe richiudere, la manovella continuerebbe nel suo moto di apertura (senso orario nell'immagine sopra), ma il blocco che viene messo impedirà tale moto.
Da notare anche il fatto che la biella che va perpendicolare a terra farà un angolo di 89.88° invece che esattamente 90 ma è trascurabile, ciò è dovuto a quel disallineamento che si è voluto nella manovella.



(a) Vista isometrica



(b) Vista laterale



(c) Vista frontale

Figura 11.10: 3 viste del sistema di blocco

Il meccanismo di blocco è composto da due perni in acciaio che si incontrano perpendicolarmente tra loro e provocano il blocco del meccanismo. Il primo perno che si innesta sulla biella è di diametro 5 mm. Esso si avita su un foro filettato (profondo 8 mm) fatto sulla biella esattamente al centro della testa superiore che si ricorda essere larga 20 mm e profonda 10 mm.

Per quanto riguarda il perno che si fissa sulla manovella esso viene fissato su un'asola e bloccato assialmente da due dadi, oppure da un dado e una testa della vite. L'asola è di diametro 4 mm. Le dimensioni vengono riportate nella foto sottostante. É stata fatte questa scelta in quanto si

può spostare il perno lungo l'asola e spostarlo in un estremità o nell'altra a seconda di come ruota la manovella (infatti la rotazione è diversa se il cinematismo sta dietro o avanti) , inoltre si può regolare di precisione e correggere eventuali giochi o interferenze di troppo o correggere l'angolo di disallineamento semplicemente facendo traslare di pochissimo il perno. L'asola ha una dimensione in lunghezza tale da consentire questi minimi movimenti di aggiustamento.

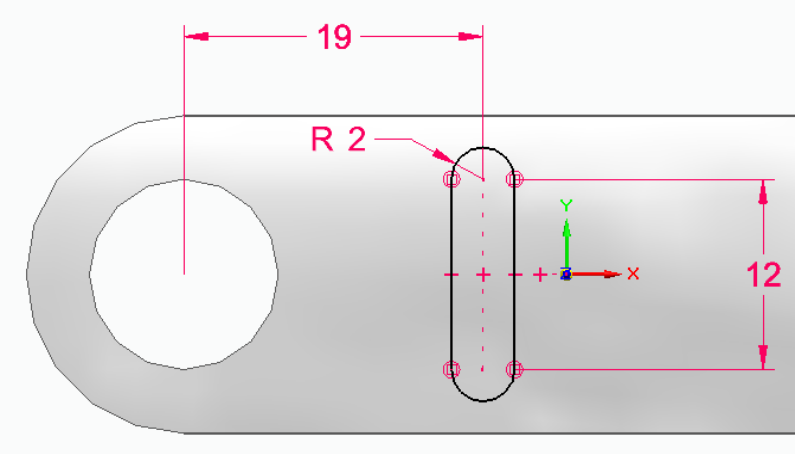


Figura 11.11: Dimensione dell'asola

11.1.6 Forchette per incernierare asta sulla piastra

Sono state progettate due forchette identiche di alluminio per andare a incernierare le due aste lì e poi successivamente le due forchette verranno fissate sulla piastra dell'AMR. Si riporta il loro disegno qui sotto. Sull'asta si andranno a posizionare le boccole "SKF" in bronzo. La flangia della boccola eviterà il contatto diretto tra l'asta e la forchetta.

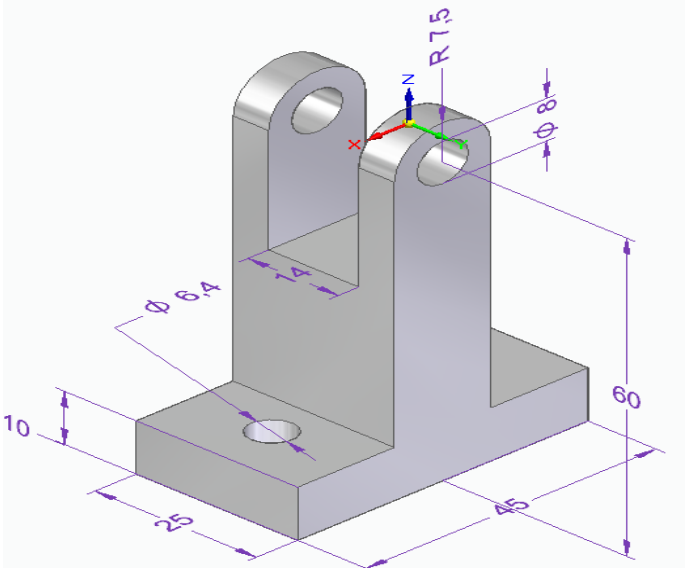


Figura 11.12: Forchetta per incernierare asta con relative dimensioni

11.1.7 Piedino in gomma di appoggio "ELESA"

Come appoggio al terreno è stato scelto un piedino in gomma dell'azienda "ELESA". Esso viene avvitato sul piede di acciaio e la sua altezza può essere regolata di precisione per fare si che ci sia il giusto contatto piede/terreno..

Modello Elesa LSX.A-40-10-AS-M8x60 ha base in tecnopolimero con sistema antiscivolo e stelo in acciaio, regge fino a 5000 N e ha un angolo di inclinazione della coppia sferica di 20°.

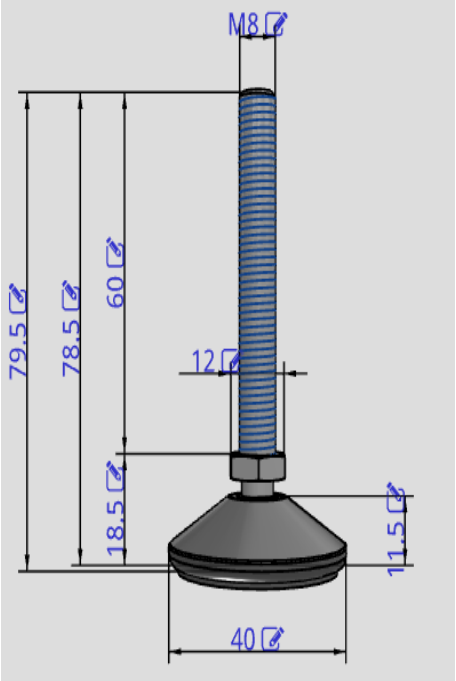


Figura 11.13: Piedino di livellamento

11.1.8 Geometrie del piedino

In questa sottosezione si riportano le dimensioni del piedino di appoggio a terra.

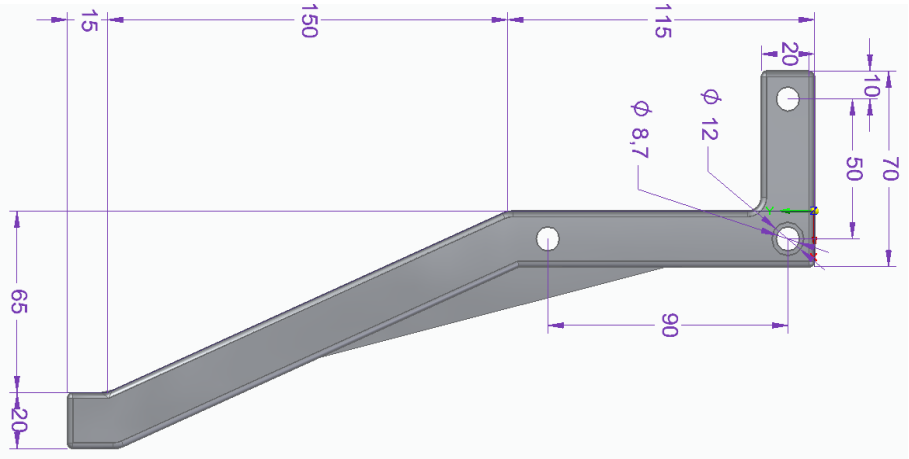


Figura 11.14: Dimensione del piede di appoggio a terra

Lo spessore è di 15 mm. Non sono molto importanti le dimensioni di ingombro che possono non essere precise ma la posizione reciproca dei fori che servono per fissare le altre aste.

É possibile applicare una nervatura di rinforzo nella parte inferiore del piedino saldando con saldatura MAG una piccola piastra di acciaio sagomata appositamente.

11.1.9 Collegamento albero-mozzo del motore

Per accoppiare la manovella con l'albero uscente dal motore si è deciso di utilizzare la linguetta già presente sull'albero.

La linguetta effettua il collegamento trasmettendo lo sforzo sulle pareti laterali, mentre radialmente esiste un gioco variabile tra 0,2 e 0,5 mm; quindi agisce per ostacolo impedendo il moto relativo di rotazione, ma non quello di traslazione. La linguetta lavora sui fianchi senza pressione radiale, quindi è soggetta a sforzi di taglio. Le linguette, per il loro modo di agire, possedendo gioco sulla testa, non generano eccentricità fra albero e mozzo, per cui sono indicate in tutti i casi dove è richiesta una rigorosa coassialità fra mozzo ed albero corrispondente: organi di trasmissione veloci e precisi come ruote dentate, pulegge, giranti di pompe. Possono essere utilizzate per trasmettere piccole potenze o piccoli momenti torcenti.e. Per la fabbricazione di linguette si usano acciai da bonifica con $Rm \geq 500N/mm^2$. La lunghezza della linguetta è circa 1,5 volte il diametro dell'albero ed è sempre più corta della larghezza del mozzo.

Per realizzare la sede della linguetta sulla manovella, il mozzo è stato diviso in due parti (vedasi figuro sottostante) in modo che la sede della linguetta poi può essere realizzata facilmente con operazioni alle macchine utensili di piallatura/limatura o fresatura senza richiedere particolari lavorazioni come ad esempio l'elettroerosione con filo.

Le due parti del mozzo poi verranno serrate tra di loro tramite due viti filettate e andranno a stringere l'albero del motore.

Si riporta nell'immagine sottostante la divisione in due del mozzo con la sede della linguetta.

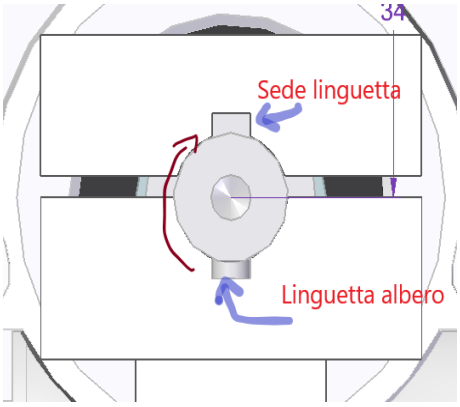


Figura 11.15: Collegamento albero mozzo

La dimensione della linguetta e della sua sede è normata secondo la UNI 6604. La linguetta in questione è di tipo B (forma arrotondata) di dimensioni 4x4x20 (b x h x L). La dimensione nominale dello scavo sul mozzo è di larghezza 4 e profondità t2 1.8 mm. Le tolleranze da rispettare per la sede nel mozzo sono:

- larghezza cava su mozzo: D10, JS9, P9
- profondità cava mozzo: $0 \rightarrow +0.1$

Il movimento assiale del mozzo è impedito dall'attrito di serraggio che esercitano le due viti per tenere unite le due estremità.

11.2 Piastra definitiva e soluzione assemblata con i 4 cinematismi

Una volta dimensionati i cinematismi è stato possibile dettagliare nello specifico la forma della piastra e si è proceduto a assemblare AMR + piastra + cinematismi.

Si riporta la piastra sopra all'AMR con i 4 cinematismi montati nell'immagine sottostante. La parte centrale è stata sagomata in quel modo per risparmiare materiale e per permettere ai cinematismi di richiudersi.

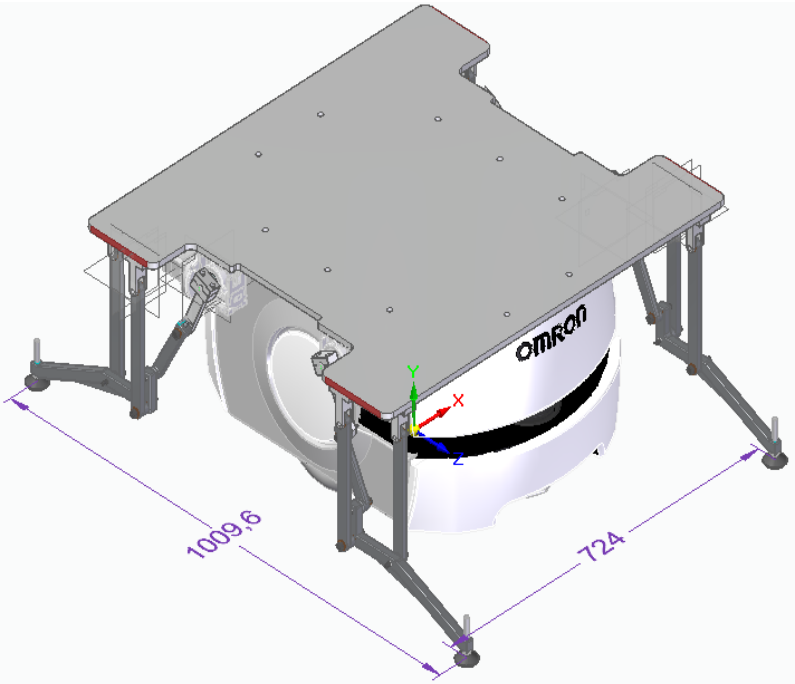


Figura 11.16: Vista isometrica dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi

Qui si nota la dimensione dell'impronta che si viene a creare che risulta essere di 724x1009 mm, ben oltre gli 800x800. Ciò è dovuto all'estensione dei piedini.

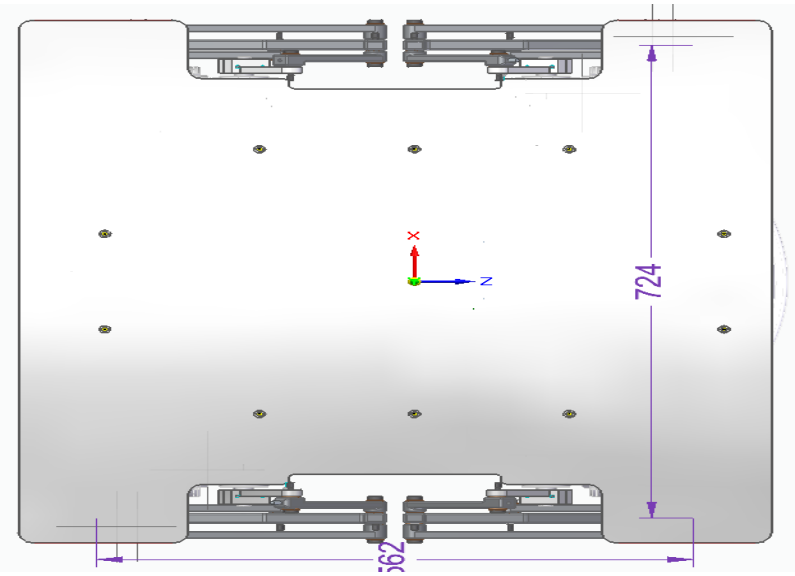


Figura 11.17: Vista dall'alto dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi

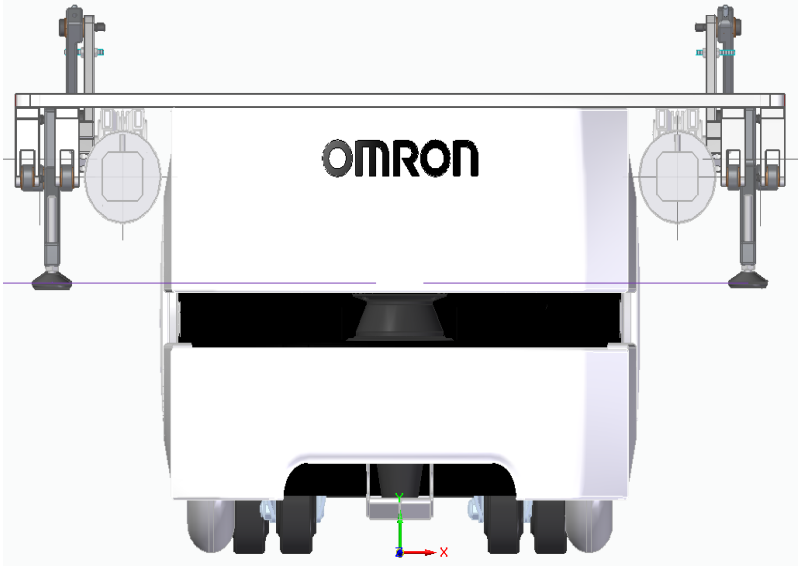


Figura 11.18: Vista frontale dell'AMR con sopra la piastra e i 4 cinematismi

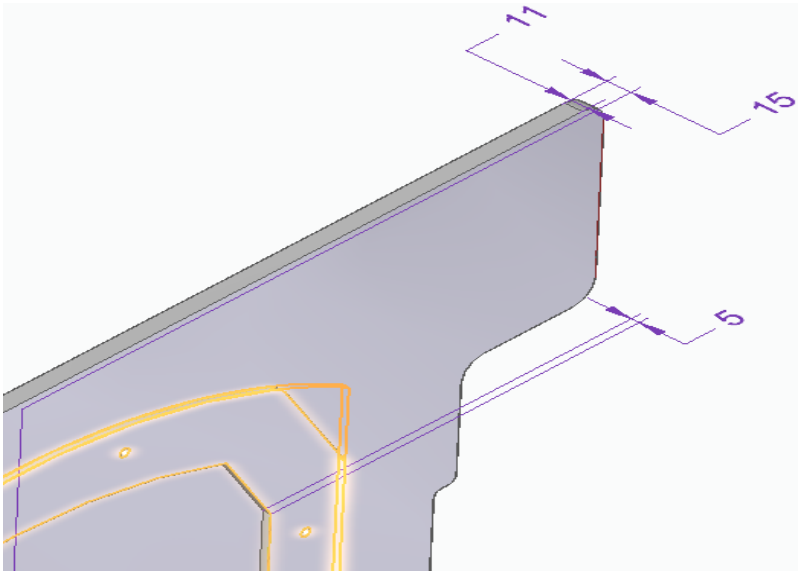


Figura 11.19: Spessori della piastra (in evidenza lo scavo interno di alleggerimento di 5 mm)

Capitolo 12

Analisi baricentro del carico trasportato dall'AMR

. L'analisi del baricentro del carico totale trasportato dall'AMR è di fondamentale importanza. Esso deve rimanere dentro una zona delimitata ben precisa la cui estensione dipende dal peso complessivo trasportato. Più il peso è elevato e più lo spazio tridimensionale è ristretto. La figura 12.1 riporta il volume nel caso di un carico massimo trasportabile di 90 Kg.

É fondamentale effettuare lo studio della posizione complessiva del baricentro del carico per verificare poi se rimarrà dentro lo spazio consentito o meno, pena l'instabilità del sistema e di conseguenza la mancata sicurezza.

Si riporta di seguito, ancora una volta per maggiore facilità di lettura, la figura del volume di sicurezza dentro cui deve stare il baricentro totale.

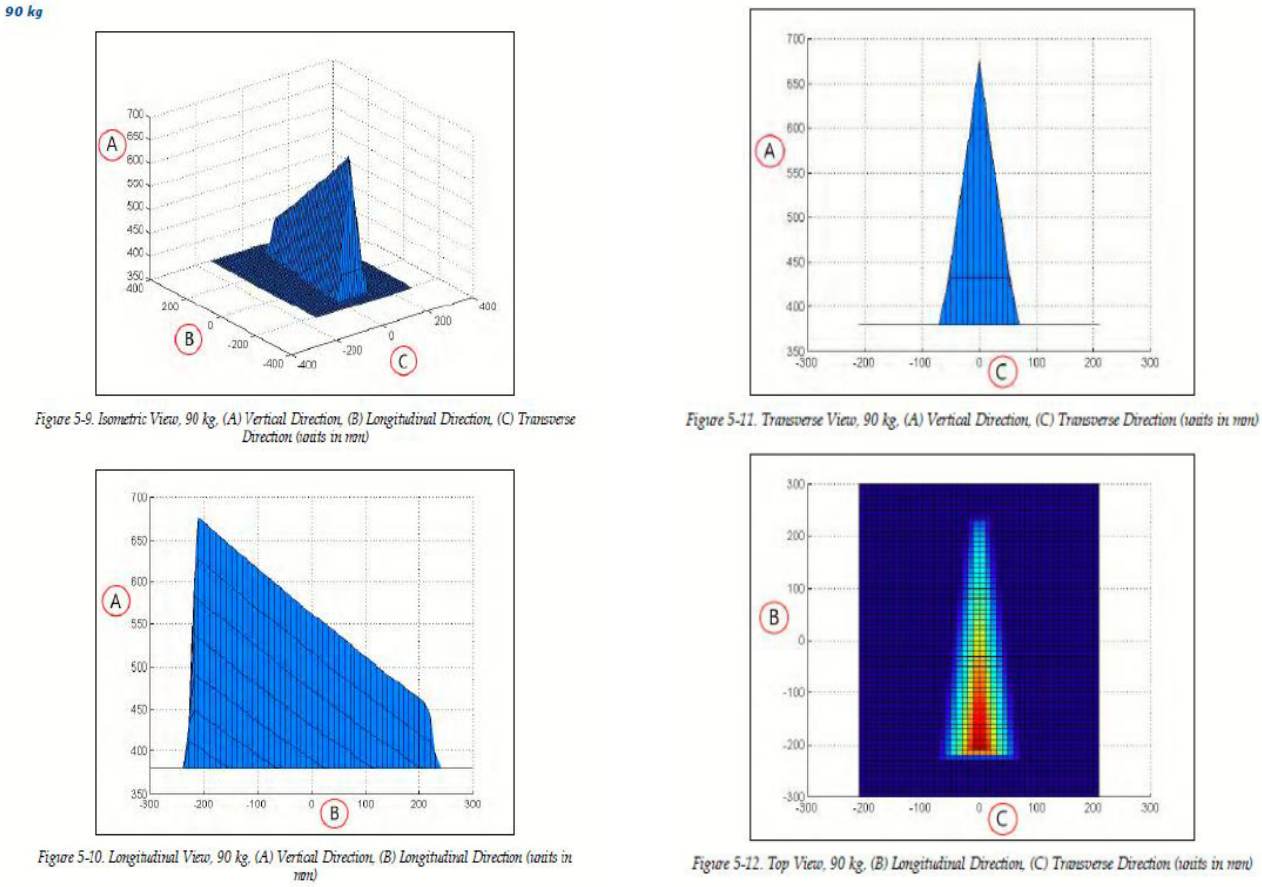


Figure 5-9. Isometric View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (B) Longitudinal Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figure 5-11. Transverse View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figure 5-10. Longitudinal View, 90 kg. (A) Vertical Direction, (B) Longitudinal Direction (units in mm)

Figure 5-12. Top View, 90 kg. (B) Longitudinal Direction, (C) Transverse Direction (units in mm)

Figura 12.1: Volume entro il quale deve ricadere il baricentro con un peso trasportato di 90 Kg

La figura di riferimento è questa qui poiché in totale sopra all'AMR si andrà a posizionare un peso all'incirca vicino ai 90 Kg. Si ricorda che se il baricentro non si trova dentro questo spazio non si può usare la massima accelerazione e decelerazione programmabile ma bisogna ridurne il modulo per garantire ugualmente stabilità.

La zona dentro cui deve rimanere è molto piccola e delimitata.Per consentire uno scostamento in altezza del baricentro, esso deve rimanere sulla mezzeria e spostato di molto verso il posteriore del robot mobile. Se ciò non fosse verificato si avrà una brusca diminuzione di altezza massima consentita, fino ad arrivare a zero (quindi il baricentro dovrà stare sulla piastra).

Ovviamente nel caso di applicazione di questa tesi è impossibile per quello che si trasporta avere il baricentro sulla piastra quindi bisognerà fare molta attenzione a fare rimanere il baricentro sulla mezzeria e il più possibile spostato dietro, cosi in tal modo si può arrivare a quei circa 300 mm di altezza dalla piastra.

Le masse in gioco sono le seguenti:

- Piastra:16 Kg
- Cinematismo di ausilio stabilità:3.85 Kg cad.uno
- Controller:14.5 Kg
- TM12:33.3 Kg
- Eventuale colonna di sollevamento: massa ipotizzata 10 Kg

Il totale delle masse considerando la colonna è di 89.2 Kg quindi si è perfettamente al limite dei 90 Kg. Ciò ovviamente inficerà sulla durata della batteria.

Per lo studio del baricentro si è implementato uno script MatLab i cui si sono caricate le masse e le posizioni dei baricentri relative di ogni componente.

Il sistema di riferimento preso in questo caso è posizionato sopra la piastra esattamente al centro dell'AMR con l'asse X lungo l'asse longitudinale del robot mobile orientato nel posteriore e asse Z verso l'alto, Y a completare la terna destrorsa.

Il sistema è altamente simmetrico rispetto all'asse X, ad eccezione del TM12. Infatti il controller è posto sulla mezzeria, quindi ha coordinata Y del baricentro pari a 0 ma Z pari a +340/2 e X uguale a -200 mm (il controller è posto nella parte avanti della piastra).
Stessa cosa per la piastra che ha coordinata sia X che Y pari a 0. I cinematismi sono 4 e disposti ai 4 angoli quindi il baricentro complessivo ha solo coordinata Z diversa da 0 ed è pari a -77 mm rispetto alla superficie superiore della piastra. L'eventuale colonna sarà posizionata sulla mezzeria e spostate verso il di dietro, quindi si avrà coordinata Y pari a 0, X pari a +100 mm.

Un discorso a parte è stato fatto per la coordinata Z, infatti la colonna non può essere tanto alta una volta richiusa pena lo sforamento del baricentro totale dallo spazio consentito. In prima fase si è assunto che la colonna abbia da chiusa un altezza di 450 mm circa e che il suo baricentro Z sia a 280 mm dalla piastra. Si vedrà poi in seguito se tale assunzione consente di rispettare la zona di sicurezza o no.

Il problema sta nel scegliere la giusta posizione di homing del TM12 affinché il suo baricentro complessivo abbia coordinata Y molto prossima a zero e coordinata Z non troppo alta (considerando che già il TM è montato sopra la colonna richiusa alta 450 mm) e coordinata X positiva verso il dietro dell'LD90, in modo tale da spingere il baricentro complessivo verso il posteriore e sfruttare l'altezza maggiore consentita.

Si è usato lo script Matlab della cinematica diretta per calcolare la posizione del baricentro del solo braccio robotico, senza carico, o altri componenti. La configurazione di partenza del robot e il suo sistema di riferimento è quello della figura **??**. In tale posizione gli angoli di giunto θ varrebbero tutti zero. Ovviamente non può essere assunta come posizione di homing questa poiche avrebbe una componente Z e Y elevata mentre X pari a zero. Si ricorda che l'obbiettivo è avere una componente Z bassa, X elevata e Y il più possibile vicino a zero. Per fare ciò si è deciso di

assegnare degli angoli θ che consentissero di movimentare il robot e di portarlo in una posizione di homing con un baricentro compatibile con la situazione appena illustrata.

Gli angoli che sono stati assegnati sono i seguenti:

- 1° giunto:-30°
- 2° giunto:+130°
- 3° giunto:+160°
- 4° giunto:-0°
- 5° giunto:+180°
- 6° giunto:0°

Con questa configurazione si ottiene un baricentro del robot pari a:

$$\vec{G_{robot}} = \begin{pmatrix} 172.96 \\ 12.30 \\ 91.45 \end{pmatrix} mm \tag{12.1}$$

Inserendo tali valori nello script Matlab del calcolo del baricentro totale del sistema e usando la classica formula per il calcolo del baricentro di un sistema composto da più corpi si ottiene che il baricentro di tutto ciò che viene trasportato sopra la piastra assume valore pari a:

$$\vec{G_{tot-carico}} = \begin{pmatrix} 77.64.01 \\ 4.47 \\ 256.74 \end{pmatrix} mm \tag{12.2}$$

Il valore di Y è molto basso, X è spostato verso il di dietro e Z è leggermente troppo alto. Con questi valori si sforerebbe di poco la zona di sicurezza dentro cui deve stare il baricentro a causa del valore di Z un po' troppo alto (si parla del ordine di 20 mm). Comunque sia il risultato potrebbe essere accettabile magari riducendo di poco le accelerazioni e decelerazioni dell'AMR.

Si può senz'altro trovare un migliore compromesso spingendo più indietro il controller magari e cercando di ridurre ulteriormente il valore di Y del baricentro totale.

Nel finale di questa trattazione si riporteranno alcune immagini del robot installato sopra una colonna e sopra l'AMR con questi angoli di giunto e si farà notare che il robot in questa posizione non crea nessuna interferenza con il resto del sistema.

Capitolo 13

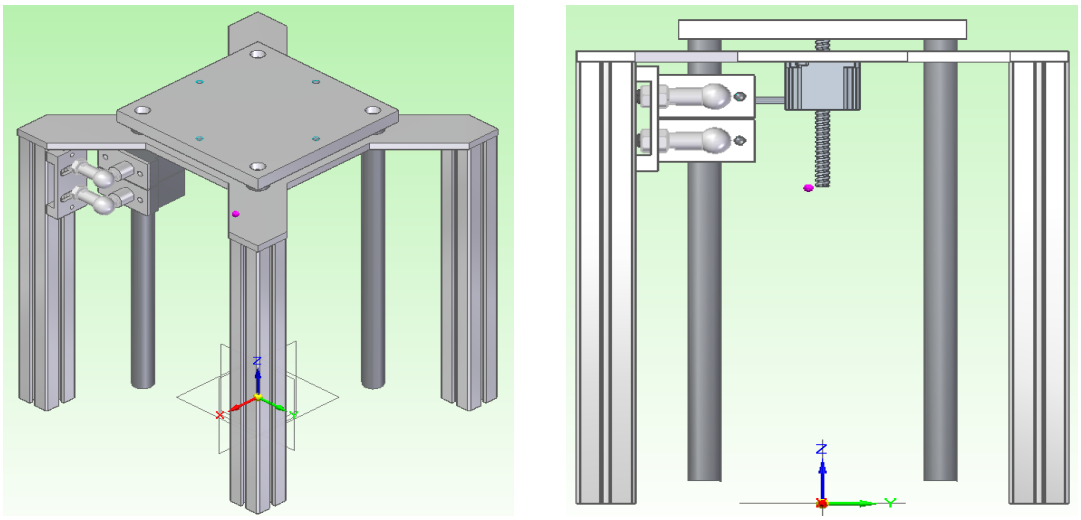
Progettazione colonna di sollevamento robot

In questo capitolo si andrà a studiare come poter effettuare il sollevamento del robot. Esso è una caratteristica aggiuntiva che consente ancora più versatilità al sistema andando a aumentare lo spazio di lavoro del robot in verticale. In questo modo si consente ad esempio il prelievo di oggetti posti su scaffali più in alto e li si può portare in basso. Per fare ciò è necessario che la colonna sia spesso in movimento con un duty cycle molto alto.

Si cerca una soluzione che consenta il massimo sollevamento del robot quando l'AMR è fermo e il robot lavora e contemporaneamente un ingombro massimo in altezza di 450 mm quando la colonna è chiusa. Questa misura di 450 mm è data dal fatto che il baricentro totale del carico trasportato deve rimanere dentro quello spazio descritto nel capitolo 12. Nello script MatLab usato nello stesso capitolo si è considerato questa altezza della colonna e si è visto che il baricentro sfora di poco in altezza il volume consentito in cui deve rimanere, ma è accettabile. L'altezza di 450 mm rappresenta il massimo consentito ma sarebbe preferibile anche meno. Questo vincolo va a determinare in maniera pesante la massima corsa di apertura ammissibile della colonna poiché ovviamente la corsa dipende da quanto spazio deve occupare quando il sistema è richiuso.

Si è cercato qualche soluzione già presente sul mercato e disponibile per essere integrata con il resto del sistema. Un'azienda leader nel settore delle colonne di sollevamento è la "Linak", essa costruisce colonne di diverse dimensioni e con diversi carichi sollevabili adatta per diversi tipi di impiego, dalla regolazione di banchi di lavoro a apparecchiature radiologiche. Una soluzione che ha le caratteristiche tecniche adatte al sistema che si sta progettando è la LC3 o la BL1 (di peso inferiore ma con prestazioni anche inferiori), il problema che tutte quante hanno un duty cycle del 10%, ciò vuol dire che il suo utilizzo può essere fatto per un 10% del tempo e il restante tempo dovranno essere fermi. Su 20 minuti solo 2 minuti possono attuarsi e il resto del tempo la colonna dovrà rimanere ferma. Ciò rende tali tecnologie inadatte allo scopo per cui dovranno essere installate poiché per tale applicazione è richiesto un movimento continuo del robot in verticale.

Per tale motivo ci si è orientati verso una soluzione progettata ad-hoc che consenta un movimento continuo della colonna. Si riporta nell'immagine sottostante la soluzione pensata e poi si descriverà la soluzione nello specifico.



(a) Vista isometrica **(b)** Vista frontale

Figura 13.1: 2 viste della colonna di sollevamento progettata

Il sistema prevede uno scorrimento di 4 alberi in acciaio temprato e rettificato di diametro 20 mm e lunghi 420 mm dentro dei manicotti a ricircolo di sfere. Il sistema viene attuato da una vite trapezia a ricircolo di sfere che provoca la traslazione della piastra alla quale verrà fissato il TM12. Il tutto viene fissato su un telaio formato da 4 profilati di alluminio alti 420 mm di sezione 45x45 mm della azienda "Alusic" e tenuti insieme da una piastra sagomata alla quale poi verrà anche fissato l'attuatore lineare. Si vede di seguito la scelta di ogni singolo componente e il motivo che ha portato a questa soluzione.

13.1 Scelta manicotti

Si è deciso di adottare dei manicotti a ricircolo di sfere per garantire il minimo attrito nello scorrimento e per facilitare il movimento e evitare che il sistema si impunti. Come si vedrà, il sistema ha un grado di libertà ma presenta dei vincoli ridondanti, infatti avere 4 alberi guida è una ridondanza ma è necessario per garantire più stabilità. Il sistema non presenta criticità se gli alberi avessero il loro asse perfettamente rettilineo e la superficie perfettamente cilindrica, ma nella realtà ciò non è possibile e quindi c'è il rischio che il sistema quando viene movimentato si impunti. Per tale motivo vengono introdotti dei gradi di labilità che consentono ai manicotti una rotazione attorno a un punto e quindi si possono adattare a eventuali imperfezioni degli alberi.

Per la scelta dei manicotti si è fatti riferimento al catalogo tecnico della "ISB" (le immagini e i dati riportati provengono da lì [20]). Di fondamentale importanza per la loro scelta è conoscere il fattore di carico statico C_0 e dinamico C di ogni manicotto. Infatti in base al carico che si ha

nell'applicazione e a questi due fattori caratteristici di ogni manicotto si è in grado di scegliere se il manicotto è idoneo o no.

L'indice utilizzato per valutare la capacità di un sistema lineare ad assorbire i carichi e /o momenti statici applicato è la: "capacità di carico statica C_0" La capacità di carico statica C_0 (o coefficiente di carico statico) è definita come quel carico statico di intensità e direzione costante che determina, nel punto di massima sollecitazione tra le parti in contatto, una deformazione permanente pari a 1/10000 del diametro dell'elemento volvente.

Il coefficiente di sicurezza statico aS (o fattore di sicurezza statica) è dato dalla seguente relazione:

$$a_s = f_C * f_B * C_0/P \tag{13.1}$$

dove:

- a_S = coefficiente di sicurezza statico
- f_C = fattore di contatto
- f_B = coefficiente di layout ricircoli
- C_0 = capacità di carico statica $[N]$
- P = carico massimo applicato $[N]$

Se due o più manicotti vengono montati su una stessa guida, la durata deve essere penalizzata per effetto di una non completa uniformità di distribuzione dei carichi applicati sui manicotti stessi. il fattore di contatto f_C tiene conto proprio di questo e assume un valore minore di uno se sono presenti più manicotti montati su un albero guida.

Il coefficiente di layout ricircoli, f_B, tiene conto che per sistemi lineari del tipo asta-manicotto, la capacità di carico statica C_0 può essere maggiorata in funzione della posizione del carico F rispetto alla posizione delle sfere; questo è dovuto ad una migliore distribuzione del carico sugli elementi volventi. Lo schema seguente riporta i coefficienti fB

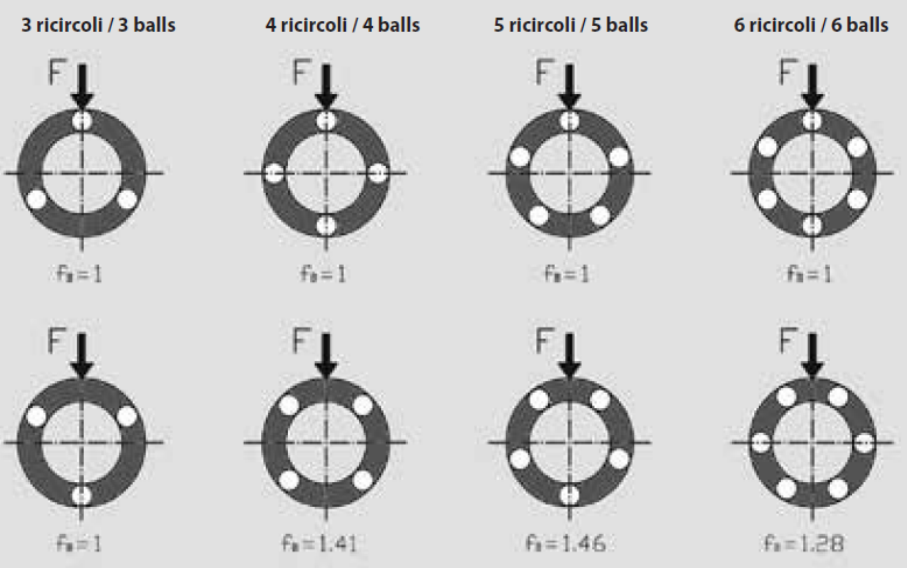


Figura 13.2: Valori di f_B

La necessità di avere un coefficiente di sicurezza statico $a_S > 1$ deriva dalla possibile presenza di urti e/o vibrazioni, momenti di avvio e arresti, carichi accidentali che pregiudicherebbero la capacità del sistema qualora non se ne fosse tenuto conto. Inoltre, per i sistemi lineari del tipo asta-manicotto con supporti dell'asta di estremità, la scelta degli elementi è funzione non solamente dei carichi in gioco, ma soprattutto della flessione dell'albero; maggiore è tale deformazione e maggiore dovrà essere il sovradimensionamento del manicotto. A titolo esemplificativo, per una freccia d'inflessione di 0.01 mm l'elemento deve essere sovradimensionato. Si riporta la tabella in cui vengono specificati i valori di a_S a seconda delle condizioni di lavoro.

Condizioni di funzionamento *Working conditions*	a_s minimi a_s *minimum*
Statico e piccole flessioni Static and very small deformations	1.0 ÷ 2.0
Dinamico con leggere flessioni Dynamic with light deformations	2.0 ÷ 4.0
Dinamico con urti, vibrazioni e leggere flessioni Dynamic with impacts, vibrations and light deformations	3.0 ÷ 5.0

Figura 13.3: Valori di a_S

L'indice utilizzato per valutare la capacità del sistema lineare ad assorbire i carichi dinamici

applicati è la: capacità di carico dinamica C La capacità di carico dinamica C (o coefficiente di carico dinamico) è definita come quel carico dinamico di intensità e direzione costante che determina una durata nominale di 50 km di percorso di spostamento; la durata viene intesa come il percorso teorico in assenza di segni di affaticamento. La capacità di carico dinamica C di un sistema lineare del tipo asta-manicotto è limitata da:

- Carichi e/o momenti applicati
- Flessioni dell'albero
- Velocità di funzionamento
- Ciclo di funzionamento

La durata nominale L (intesa come quel percorso teorico raggiunto da almeno il 90% di un significativo quantitativo di uguali cuscinetti a sfere senza formazione di segnali di affaticamento), è data dalla seguente relazione:

$$L = (C/P)^3 * 50 \tag{13.2}$$

dove:

- L = durata nominale $[km]$
- C = capacità di carico dinamica $[N]$
- P = carico equivalente applicato $[N]$

Questa relazione vale nelle ipotesi di:

- Temperatura della pista di rotolamento ≤ 100řC
- Durezza delle piste di rotolamento ≥ 58 HRC
- Assenza di urti e vibrazioni
- Velocità di scorrimento < 15 m/min
- Manicotto singolo su albero, $fC = 1$
- Flessioni dell'albero nulle

altrimenti si deve adottare la seguente formula che tiene conto di eventuali fattori che potrebbero ridurre la vita utile L:

$$L = a_1 * ((f_H * f_T * f_C * f_B * C)/(f_W * P))^3 * 50 \tag{13.3}$$

dove:

- L = durata nominale $[km]$
- a_1 = fattore di probabilità di cedimento
- f_H = fattore di durezza
- f_T = fattore di temperatura
- f_C = fattore di contatto (vedasi coefficiente di sicurezza statico)
- f_B = coefficiente layout (vedasi coefficiente di sicurezza statico)
- f_W = fattore di carico
- C = capacità di carico dinamica $[N]$
- P = carico equivalente applicato $[N]$

Ognuno di questi fattori assume dei valori diversi. Nello specifico il fattore di temperatura vale 1 se si lavora nel range -20° +100° mentre minore di uno per altre temperature (c'è un grafico apposta per leggere il valore in funzione della temperatura); il fattore di durezza vale 1 per durezze dell'albero guida maggiori di 58 HRC altrimenti anche qui c'è un grafico che ne determina il valore minore di 1.

Importante è il fattore f_W: qualora non fosse possibile calcolare con esattezza tutti i carichi dinamici applicati, quali ad esempio forze d'inerzia e relativi momenti generati, vibrazioni ed eventuali urti generati specialmente alle alte velocità, tali fenomeni devono essere considerati tramite questo fattore.

Condizioni di lavoro *Working conditions*	f_w
Urti e vibrazioni assenti e/o velocità bassa *No impacts, no vibrations and/or slow speed* (v ≤ 15 m/min)	1.0 ÷ 1.5
Urti e vibrazioni leggeri e/o velocità media *Light impacts and light vibrations, medium speed* (15 < v < 60 m/min)	1.5 ÷ 2.0
Urti e vibrazioni forti e/o velocità alta *Hard impacts and hard vibrations, high speed* (v ≥ 60 m/min)	2.0 ÷ 3.5

Figura 13.4: Valori di f_W

Il fattore a_1 tiene conto della probabilità di non cedimento C%.

C%	80	85	90	92	95	96	97	98	99
a_1	1.96	1.48	1.00	0.81	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

Figura 13.5: Valori di a_1

Per determinare il carico equivalente P del caso in esame si è considerato come caso critico quello in cui si scarica sulla colonna un momento torcente di 311 Nm dovuto all'applicazione della massima coppia sul primo giunto. In tal caso si scarica una forza radiale sui manicotti che si oppone a questo momento torcente. Nella configurazione mostrata in figura, essendo i 4 alberi disposti su un quadrato di 180x180 mm si avrà un braccio della forza di 0.127 metri. La forza radiale agente su ogni cuscinetto si calcola come:

$$F_r = \frac{M}{4 * 0.127} = 624N \tag{13.4}$$

Disponendo due manicotti per ogni albero si ha che per ogni manicotto agisce 312 N di forza radiale.

Si è scelti la serie SCV della "ISB" che sono dei manicotti della serie pesante con supporto in alluminio. scegliendo un manicotto con albero di 20 mm si ha $C_0 = 1400N$ e $C = 900N$. Usando le formule (13.1) e (13.3) con i valori di:

- a_1 fattore di probabilità di cedimento=0.53 (96%)
- f_H fattore di durezza=1
- f_T fattore di temperatura=1
- f_C fattore di contatto=0.81
- f_B coefficiente layout=1 (non si sa come saranno messe le sfere e quindi per maggiore conservatività si sceglie 1)
- f_W fattore di carico=1.5
- C capacità di carico dinamica=900$[N]$
- C_0 capacità di carico statica=1400$[N]$
- P carico equivalente applicato=312$[N]$

si ottiene un valore di:

- a_S=3.63
- L=100.15 Km

Sono valori del tutto accettabili e quindi 20 mm di diametro può essere più che sufficiente.

13.2 Snodi sferici

Come già accennato nella sezione precedente, è importante dare un po' di labilità ai manicotti e consentirgli così di muoversi e adattarsi meglio all'albero che gli scorre attraverso. Ciò ha lo scopo di evitare l'impuntamento del meccanismo. Per fare questo i manicotti non sono stati accoppiati saldamente al telaio ma sono stati incernierati su dei nodi sferici in acciaio che gli consente quindi una rotazione attorno a un punto fisso. Sono stati scelti gli snodi sferici "Nadella" DCSL 16 M12x1.75 che hanno un diametro della tasta sferica di 16 mm.

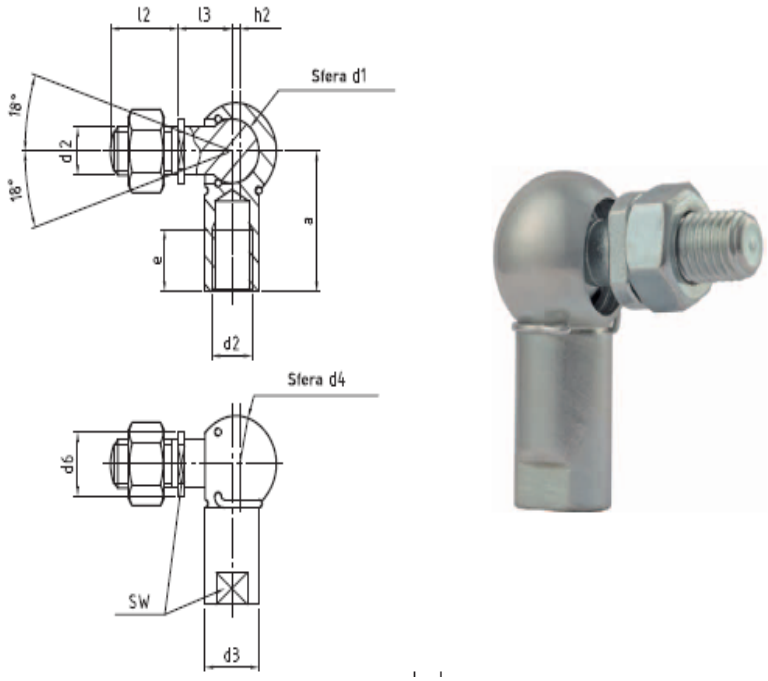


Figura 13.6: Snodo sferico

Gli alberi di acciaio rettificato e temprato possono o essere incastrati con la piastra mobile attraverso delle viti oppure si può pensare anche qui di incernierare con uno snodo sferico piuttosto che incastrare in modo tale che da consentire un altro piccolo movimento. Tuttavia tale soluzione è da provare sul campo e vedere se funziona oppure comporta una instabilità eccessiva del TM12.

13.3 Profili di alluminio e piastra di fissaggio TM12

Per quanto riguarda i profili di alluminio si sono scelti quelli dell'azienda "Alusic" . Nell'immagine sottostante si riportano tutte le caratteristiche strutturali.

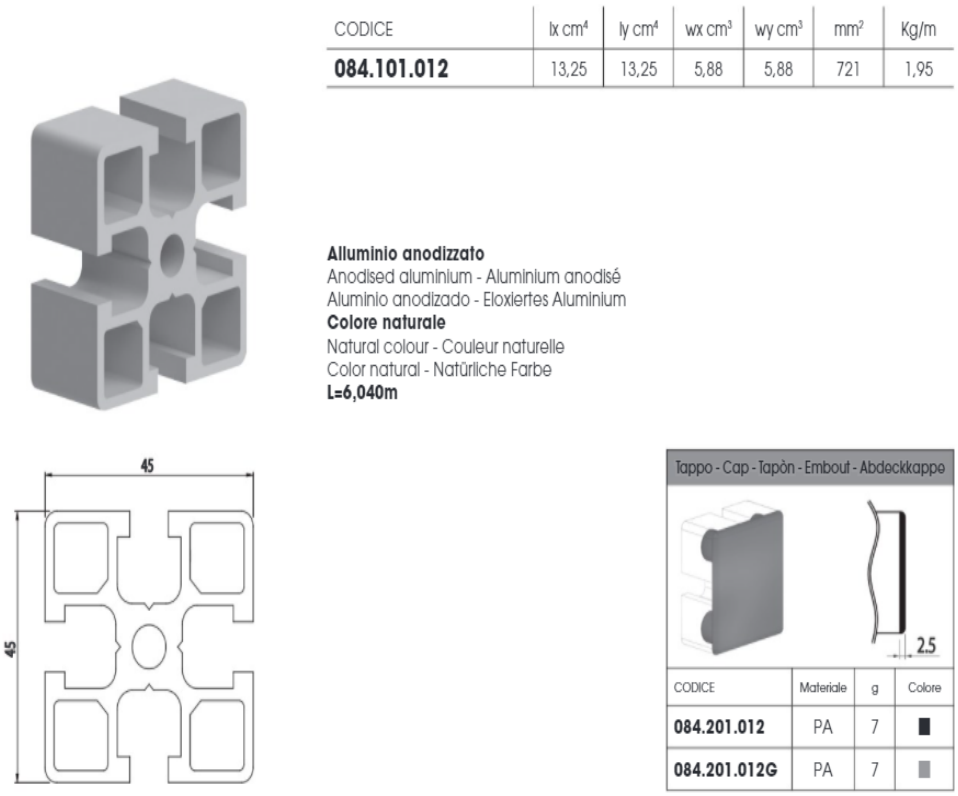


Figura 13.7: Profilo di alluminio

Per quanto riguarda la piastra dove verrà fissato il TM12 è stata fatta una piastra 220x220 mm e spessa 18 mm di alluminio.
Omron prescrive alcune indicazioni per garantire la sicurezza del robot: il robot può essere fissato ad un'altra superficie con l'uso di 4 viti M10 e rondelle. o. La coppia di serraggio raccomandata è di 40 Nm.

Il TM Robot deve essere saldamente avvitato prima dell'uso. La resistenza della superficie di montaggio deve essere sufficiente a garantire il bloccaggio Quando opera ad alta velocità, il robot può generare fino a 710 N di forza di reazione sulla superficie di montaggio sulle viti. Per evitare una diminuzione delle prestazioni causata dallo slittamento del robot o vibrazioni, la superficie di montaggio raccomandata dovrebbe essere una piastra d'acciaio di almeno 25 mm di spessore, la sua planarità dovrebbe essere di 0,1 mm o meno, la sua rugosità superficiale dovrebbe essere Rz25 o meno. La vite raccomandata è M10 x L35 mm, almeno 8,8 di classe di resistenza. Nel caso specifico si è scelto di fare una piastra di alluminio piuttosto che acciaio e meno spessa per ridurre il peso. Per migliorare la tenuta si possono usare dei controdadi da avvitare sotto la piastra che vanno a serrare la vite. Si è scelta questa configurazione poiché si andrà poche volte o mai a coppie e velocità alte, si è quindi preferito tenere più sotto controllo il peso.

13.4 Attuatore lineare a vite trapezia

É stata scelta la soluzione dell'attuatore lineare a vite trapezia poiché garantisce un'irreversibilità naturale del moto potendo cosi scollegare il motore nel caso di non funzionamento della colonna. Nello specifico è stato scelto un prodotto dell'azienda americana "DINGS": una soluzione con un motore passo-passo nema24 (60 mm)con vite trapezia che scorre al suo interno. La rotazione della vite trapezia è impedita in quanto la sua estremità è incastrata tramite una filettatura M6 sulla piastra del TM12; essendo bloccato anche il motore sulla piastra del telaio; l'effetto che si ha è uno scorrimento della vite trapezia all'interno del motore, con conseguente innalzamento e abbassamento della piastra. Tale soluzione prende il nome di "non captive" sul sito del produttore. La soluzione nema24 è in grado di spingere fino a 1050 N

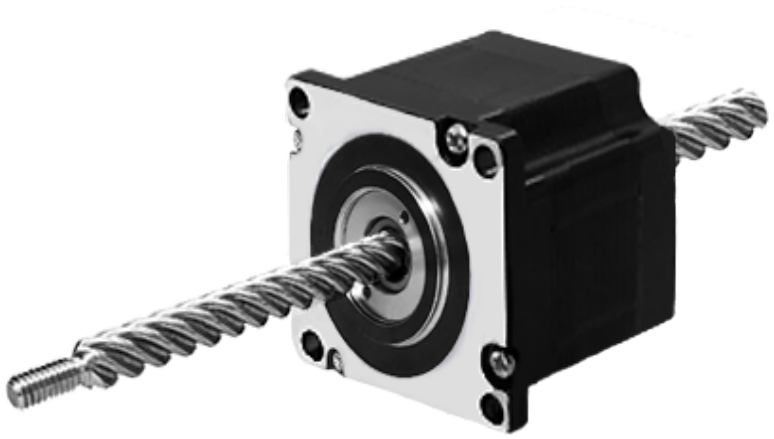
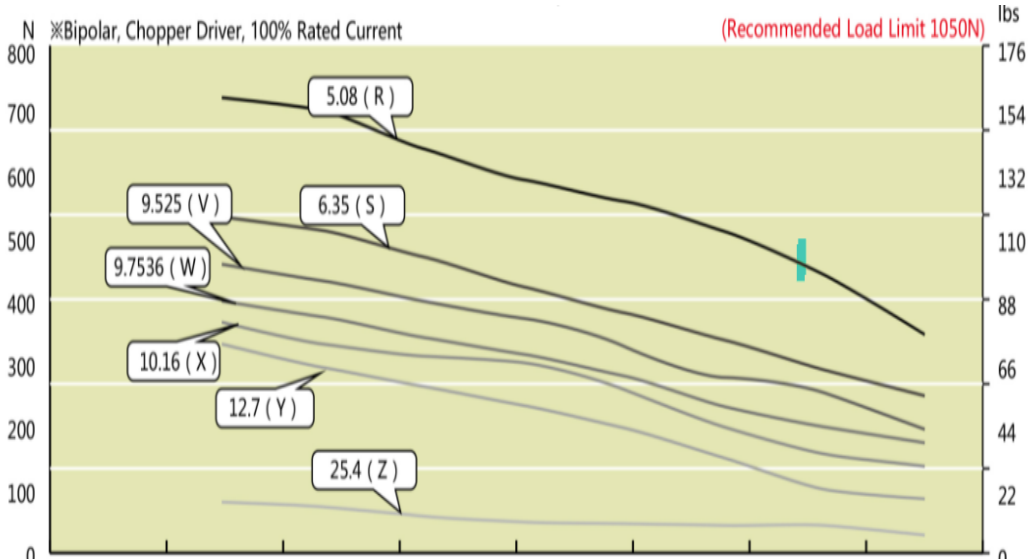


Figura 13.8: DINGS NEMA24 non-captive

Sul sito `http://www.dingsmotion.com/products/01/products-detail-01-s24.php` sono riportate tutte le caratteristiche e le dimensioni dell'attuatore.
É possibile scegliere il passo della vite trapezia, ciò ovviamente influisce sulle velocità di traslazione. Tramite il grafico spinta/velocità è possibile scegliere in base al carico da traslare e la velocità che si vuole ottenere, l'avanzamento della vite. Nel caso in esame è stato scelto un avanzamento codificato con la lettera R di 5.08 mm/rev. L'avanzamento è pari al passo per il numero dei principi della vite.
Si riporta il grafico spinta/velocità.



Z	25.4	76.2	127.0	190.5	254.0	317.5	381.0
Y	12.7	38.1	63.5	95.3	127.0	158.8	190.5
X	10.2	30.5	50.8	76.2	101.6	127.0	152.4
W	9.8	29.3	48.8	73.2	97.5	121.9	146.3
V	9.5	28.6	47.6	71.4	95.3	119.1	142.9
S	6.4	19.1	31.8	47.6	63.5	79.4	95.3
R	5.1	15.2	25.4	38.1	50.8	63.5	76.2
rpm	60	180	300	450	600	750	900
pps	200	600	1000	1500	2000	2500	3000

Figura 13.9: Grafico spinta/velocità NEMA24

Con l'avanzamento R considerando che si devono alzare $33.3 + 12kg$ di carico quindi sui 450 N si ha una velocità di 63 mm/s con 750 rpm. É stato scelto l'avanzamento R perché è quello che consente la massima velocità di traslazione con quel carico. Per tutti i dettagli e le caratteristiche del motore si rimanda al sito sopra riportato.

13.5 Analisi dei pesi

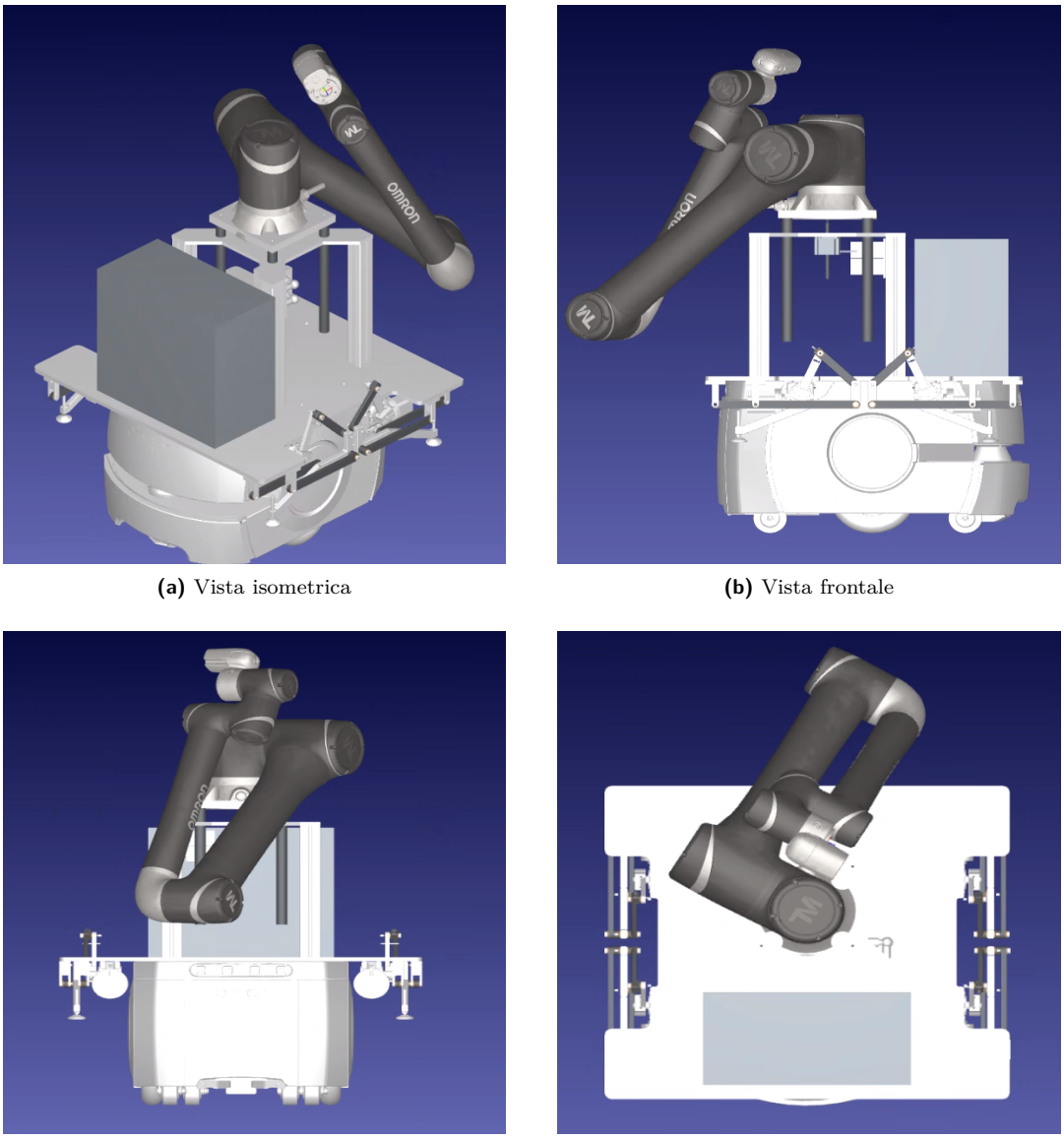
Un problema registrato e lasciato aperto per sviluppi futuri è quello del peso.
In prima ipotesi era stato ipotizzato un peso complessivo della colonna di 10 Kg e cosi facendo si raggiungeva un peso di 89.2 Kg trasportati dall'AMR e si era al limite quindi dei 90 Kg. Nella soluzione progettata e illustrata in questo capitolo, con un altezza da richiuso di 450 mm si viene a creare una colonna dal peso molto superiore di 10 Kg. Ciò è dovuto in primis alla lunghezza degli alberi in acciaio che hanno un peso non irrilevante e anche dalla lunghezza dei profilati di alluminio, nonché dalle due piastre il alluminio. Con tale configurazione considerando anche gli 8 manicotti dal peso ognuno di 0.2 Kg, gli 8 snodi sferici e il motore dal peso di 0.6 Kg con la vite si arriva

facilmente ai 19 kg di peso. Per ridurre il peso è necessario ridurre la lunghezza degli alberi, ma ciò impedisce un adeguato sviluppo in altezza della colonna (nella configurazione attuale la colonna raggiunge una altezza complessiva di 760 mm circa dalla piastra dell'AMR), oppure si dovrà per forza superare il limite dei 90 Kg trasportabili dall'AMR comunicandolo al software (è possibile ciò) o ripensare e migliorare il layout della colonna con futuri miglioramenti volti a garantire sia sviluppo in altezza che minor peso.

Capitolo 14

Soluzione finale

in questo capitolo si riporta la soluzione finale progettata. Il sistema prevede l'integrazione di un AMR con un manipolatore, tuttavia per garantire la stabilità sono stati inseriti 4 cinematismi che fungono da appoggio quando il robot TM lavora e in aggiunta anche la colonna di sollevamento. Si riporta delle immagini fatte con robotDK in cui è presente il TM12,sopra alla colonna e sopra l'AMR, nella posizione di homing con gli angoli stabiliti nel capitolo 12. Come si può notare la posizione di homing non interferisce con gli altri componenti e permette di avere il baricentro complessivo sotto controllo.



(a) Vista isometrica

(b) Vista frontale

(c) Vista dal retro

(d) Vista dall'alto

Figura 14.1: 4 viste dell'intero sistema progettato

Da notare anche l'inserimento del controller nell'anteriore. Il suo centro è posto a una distanza di 200 mm dal centro dell'AMR precisamente simmetrico rispetto alla mezzeria longitudinale. Il centro della colonna è stato posto invece 100 mm dal centro dell'AMR verso il posteriore e sempre simmetrica rispetto all'asse longitudinale.

Si riporta un'immagine di SolidEdge in cui si nota il sistema in funzione con i cinematismi in movimento e il TM12 fuori dalla posizione di homing.

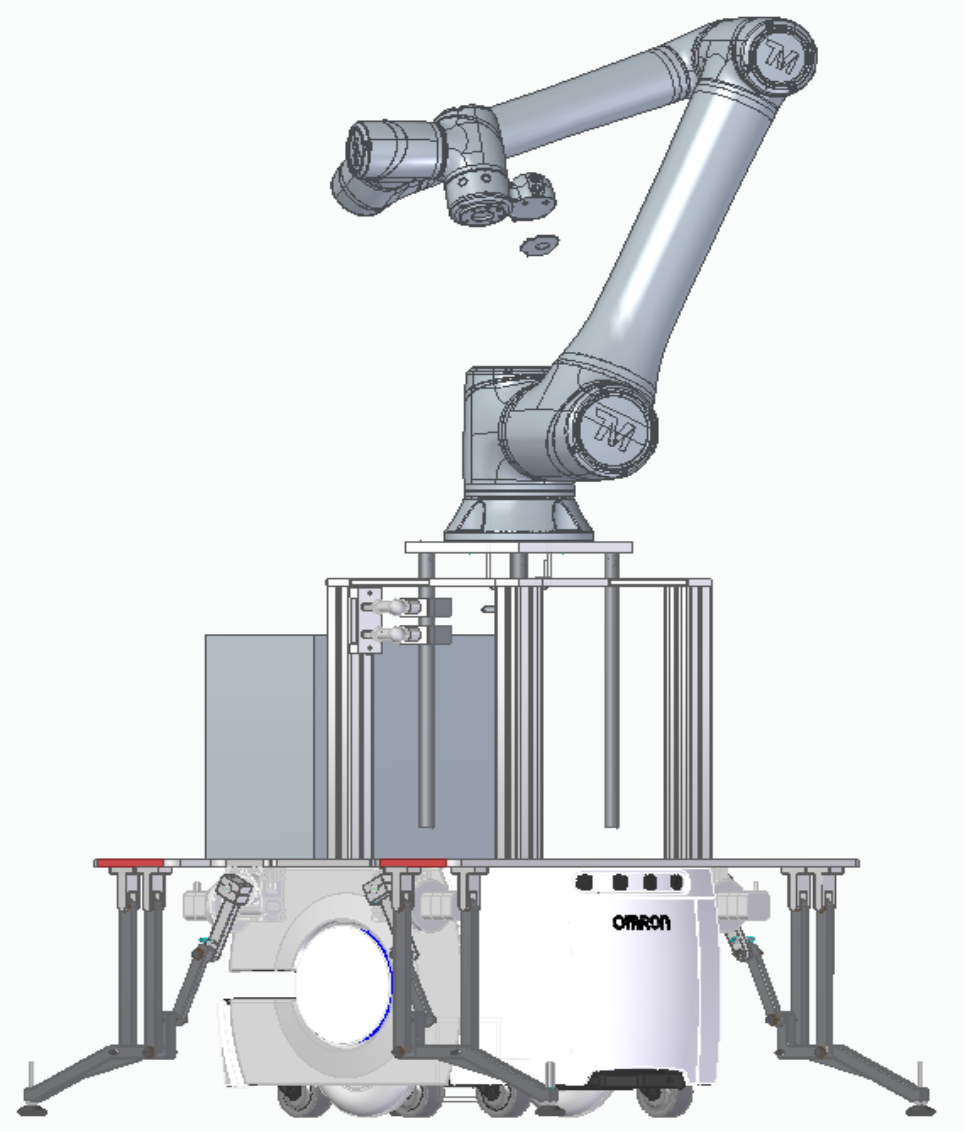


Figura 14.2: Vista complessiva del sistema mentre il TM12 è in funzione

Per quanto riguarda la parte elettrica sono stati usati 4 motori brushless INTECNO per i cinematismi e 1 motore passo-passo DINGS per la vite trapezia. Essi rispettivamente assorbono 24 V 3.5 A e il passo a passo scegliendo la configurazione più piccola 3 V 2 A. Si rientra pertanto nei limiti dei 24 A disponibili 22-30 VDC.

Per quanto riguarda la scelta dei materiali per l'alluminio si è scelto una lega serie 7000, nel particolare una 7020 stato T6.

Lo Zinco è il principale elemento di lega serie 7000, elemento che ha la più elevata solubilità nell'alluminio. Generalmente le leghe binarie non vengono usate preferendo leghe Al-Zn-Mg. Si tratta di leghe da trattamento termico con le più elevate caratteristiche meccaniche tra le leghe di alluminio; grazie allo Zinco si aumenta resistenza e durezza oltre una migliore autotemprabilità.

Inoltre le leghe Al-Zn-Mg a seguito di trattamento termico hanno la più elevata resistenza trazione tra tutte le leghe di alluminio.

Buona lavorabilità alle macchine utensili e scarsa saldabilità per fusione. Utilizzate in generale per parti molto sollecitate.

L'Alcast è la lega 7020/7021 T6 che garantisce un'eccellente combinazione di proprietà meccaniche e tensioni residue ridotte. La stabilità dimensionale in fase di utilizzo e lavorazione, le elevate caratteristiche meccaniche e l'eccellente lucentezza rendono l'Alcast adatto per la costruzione di stampi per materie plastiche, modelli, stampi tecnici e costruzioni per oleodinamica speciali e per tutte le lavorazioni meccaniche in genere. La tecnologia di colata e l'alta percentuale di metallo in purezza garantisce una minima porosità attraverso tutta la sezione della placca.

La sua composizione chimica è:

- Zn: 4/5 %
- Mg: 1/1.5%
- Alluminio per il resto

Esso ha una buona attitudine all'anodizzazione e una buona resistenza a corrosione in ambiente atmosferici classici. L'Alcast permette una elevata lavorabilità favorita dalla stabilità di forma e dal truciolo a scaglia fine; ottima capacità di trasferimento di calore e possibilità di lavorazioni ad alta velocità.

Proprietà fisiche (valori indicativi allo stato fisico T6)

- peso specifico: 2.78 g/cm3
- modulo d'elasticità: 72000 MPa
- coefficiente di dilatazione termica lineare: $23.6 * 10^{-6} K^{-1}$

Per le tre piastre che occorre realizzare in alluminio è prevista un'anodizzazione decorativa che ha lo scopo di migliorare la qualità estetica delle piastre e proteggerle ulteriormente dalla corrosione. L'attitudine all'anodizzazione della lega 7020 è buona quindi si può fare tale trattamento superficiale.

L'anodizzazione (detta anche ossidazione anodica) è un processo elettrochimico mediante il quale uno strato protettivo di ossido si forma sulla superficie del metallo da trattare.

Il processo viene denominato anodizzazione in quanto i pezzi da trattare vengono collegati al polo positivo di una cella elettrolitica, denominato anodo. Il processo avviene per immersione in una

soluzione denominata elettrolita e la corrente catodica viene applicata a un materiale conduttore, denominato catodo, immerso in tale soluzione.

Il processo di anodizzazione in acido solforico avviene per immersione in una soluzione di acido solforico al 20% circa.

Al pezzo da trattare viene applicata la corrente anodica, mentre la corrente catodica viene applicata al catodo che è solitamente in alluminio o piombo.

Applicando corrente alla cella elettrolitica vengono rilasciati ioni ossigeno sulla superficie dell'anodo, che si combinano con gli atomi di alluminio, formando ossido di alluminio.

Per quanto riguarda il trattamento termico T6, tale sigla sta a indicare un trattamento di tempra di solubilizzazione e invecchiamento artificiale.

L'invecchiamento è un processo utilizzato per aumentare la resistenza producendo precipitati del materiale della lega nella struttura metallica. La solubilizzazione consiste nel riscaldamento di una lega ad una temperatura adeguata, mantenendo tale temperatura per un periodo sufficiente a causare la trasformazione di uno o più costituenti in una soluzione solida e quindi raffreddandola in modo sufficientemente rapido per mantenere tali costituenti nella soluzione. Gli ulteriori trattamenti termici per precipitazione consentono il rilascio controllato di tali costituenti sia naturalmente (a temperatura ambiente) che artificialmente (a temperature più elevate).

Il trattamento termico di "soluzione" ha lo scopo di sciogliere completamente le strutture cristalline presenti nelle leghe (tipicamente quelle dopo fusione), quando non idonee. E' un trattamento preparatorio all'invecchiamento.

Per i componenti in acciaio si sceglie un AISI 304, ottimo sia esteticamente che per le sue proprietà meccaniche, oltretutto è anche facilmente saldabile e lavorabile. L'AISI 304 è un acciaio inox austenitico amagnetico, composta da un tenore di cromo tra il 18% e il 20% e di nichel tra l'8% e l'11%; la sua densità è pari a 7,9 kg/dm3.

Capitolo 15

Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Da questa trattazione si è evinto il grandissimo potenziale della robotica collaborativa e la sua vertiginosa crescita. Ci si è focalizzati su una delle ultime innovazioni in tale ambito , ovvero la nascita degli AMR e l'integrazione di AMR con bracci cobotici.

Si è illustrato nel dettaglio li sistema da voler realizzare su richiesta dell'azienda "Joytek " con la quale è stato svolto questo lavoro e poi sono state spiegate dettagliatamente le soluzioni progettuali adottate.

Nella prima parte si è fatto uno studio dello stato dell'arte di tale tecnologie e sono state raccolte informazioni dei due prodotti "Omron" che si vanno a utilizzare ovvero LD90 e il TM12. Una volta acquisite le informazioni di base si è proceduto con la progettazione vera e propria.

Come sempre nella progettazione sono state fatte delle scelte di compromesso e mirate, che hanno portato avanti e messo in primo piano alcuni fattori e tralasciato altri.

Un fattore tenuto in considerazione fin da subito e messo al centro di ogni scelta è stato quello di garantire la stabilità dell'AMR in qualsiasi condizione di lavoro del TM12. É stata fatta una trattazione scientifica e rigorosa tramite l'ausilio del programma Matlab per lo studio della stabilità e quindi capire di quanto si debba aumentare l'impronta per garantirla.

Con l'impronta realizzata non si avranno problemi di tale tipo, è stato applicato un fattore di sicurezza ampio, anche se ciò comporta una inevitabile massa aggiuntiva della piastra e dei cinematismi, nonché un ulteriore consumo di energia della batteria a discapito della sua durata poiché è richiesto l'azionamento di 4 motori che dovranno funzionare per brevi periodi.

L'azienda ha deciso di non giocare a ribasso puntando su un TM5, ma tenendo alta la versatilità di lavoro e quindi preferendo il TM12. Con la soluzione del TM5 si avrebbe avuto minor peso, ingombro e minor coppie e forze di reazioni. Ciò avrebbe comportato un'impronta più piccola e si avrebbe avuto una notevole diminuzione di peso e quindi un risparmio sulla batteria.

La soluzione del TM5 è assolutamente da preferire qualora il cliente finale non abbia necessità di movimentare pesi superiori ai 4 Kg.

La soluzione del TM12 è sicuramente più versatile e adatta a un portafoglio di clienti più ampio pur comportando alcuni evidenti svantaggi.

Una possibilità per allargare l'impronta è quella di installare un telaio fisso attorno all'AMR che tocchi terra con 4 ruote orientabili. I punti di appoggio a terra sono forniti dalle ruote e l'AMR non deve fare altro che trascinare con se questo carrello. Tale soluzione è stata scartata dall'azienda poiché risulta essere troppo ingombrante e poco adatta a lavorare in spazi stretti.

Nei possibili sviluppi futuri che la Joytek porterà avanti con il suo personale o con l'ausilio di altri tesisti, si può rivedere e pensare una soluzione che consenta un'impronta così ampia ma riducendo la superficie della piastra in modo tale da risparmiare peso e studiare dei cinematismi di apertura meno ingombranti in grado di aprirsi lungo la diagonale della piastra dell'AMR così che non occorra una piastra così larga in un senso.

Per quanto riguarda la colonna di sollevamento essa è personalizzabile e il cliente finale può decidere se ometterla o integrarla. La soluzione proposta è un concept che può senza dubbi, una volta note le richieste specifiche del cliente, essere migliorata. Il fattore maggiormente critico da tenere in considerazione nella sua progettazione è il peso, che deve essere il più basso possibile ma al tempo stesso garantire stabilità, ed una buona elevazione.

In conclusione le potenzialità di questa soluzione sono ottime, ma ci sono spazi di miglioramento. Sono stati realizzati già dei concept utilizzando sempre LD90 con TM12 ma senza colonna di sollevamento e inoltre l'impronta realizzata è molto piccola. Infatti per garantire comunque la stabilità, si movimentano piccole masse e con velocità molto basse. Una soluzione trovata utilizza il carrello come descritto sopra mentre un'altra due semplici pistoncini elettrici che scendono quando l'AMR è fermo ma che allargano di poco l'impronta.

Con un LD90 si rischia di andare in sofferenza facilmente per quanto riguarda il peso trasportato ma anche la durata della batteria, che rischia di deludere le aspettative. Esso si presta molto bene a realizzare tale soluzione con un TM5 mentre con un TM12 si avranno da un lato dei vantaggi in termini di prestazione del cobot, ma dall'altro dei svantaggi abbastanza evidenti per il robot mobile. La stessa casa madre Omron suggerisce di usare il modello LD250 per montarci sopra il TM12, in tal caso non si avranno più problemi di batteria, peso e inoltre non occorre più allargare l'impronta in quanto già di suo è molto più ampia rispetto a un LD90, ma si avranno sicuramente maggior costi.

Come sempre sta al cliente finale fare il giusto trade-off tra vantaggi e svantaggi e scegliere la soluzione più indicata a lui.

Bibliografia

[1] Wikipedia: industry 4.0. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0

[2] Network digital360: che cosa è l'industria 4.0 e perché bisogna saperla affrontare. [Online]. Available: https://www.economyup.it/innovazione/cos-e-l-industria-40-e-perche-e-importante-saperla-affrontare/

[3] Prima srl: industry 4.0. [Online]. Available: http://www.webprima.it/home/blog/40-offerte/111-start-up

[4] Assolombarda. [Online]. Available: https://www.assolombarda.it/centro-studi/the-future-of-jobs-and-skills/

[5] Alumotion:alla scoperta dei robot collaborativi. [Online]. Available: https://www.alumotion.eu/2019/11/alla-scoperta-dei-robot-collaborativi-cobot-10-domande-per-conoscerli-meglio/

[6] Tenenga: vantaggi cobot. [Online]. Available: https://www.tenenga.it/robot-collaborativi-cobot-modelli-applicazioni-vantaggi/

[7] industria italiana: cobot. [Online]. Available: https://www.industriaitaliana.it/robot-automazione-robotica-patrizio-bianchi-idc-agv-amr-international-federation-robotics/

[8] Mir: Agv vs amr. [Online]. Available: https://www.mobile-industrial-robots.com/it/insights/get-started-with-amrs/agv-vs-amr-whats-the-difference/

[9] Harmonicdrive: robotica mobile. [Online]. Available: https://harmonicdrive.de/it/glossario/robotica-mobile

[10] Innovationpost: mercato robotica mobile. [Online]. Available: https://www.innovationpost.it/2020/09/23/il-mercato-dei-robot-mobili-crescera-del-24-nel-2020-nonostante-la-pandemia/

[11] Innovationpost: trend robotica mobile. [Online]. Available: https://www.innovationpost.it/2020/11/04/trend-robot-mobili-concorrenza-prezzi-servizi/

[12] Kuka: kmr iiwa. [Online]. Available: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/robot-mobili/kmr-iiwa

[13] "Omron techman integration guide," Omron.

[14] Wikipedia: omron. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Omron

[15] "Ld platfrom user's guide," Omron.

[16] "Tm12 guide book," Omron.

[17] "Tm5 guide book," Omron.

[18] M. Callegari, "Cinematica dei robot," Università Politecnica delle Marche, appunti del corso di meccanica delle macchine automatiche.

[19] Skf, dimensionameto boccole. [Online]. Available: https://www.skf.com/it/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/principles/selecting-bearing-size/requisite-bearing-size

[20] "Isb: cuscinetti per movimentazioni lineari," Isb.