

UNIVERSITÀ' DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Tesi di Laurea

**STUDIO DI FATTIBILITA' E PROGETTAGIONE
DI UN SISTEMA DI LETTURA RFID PER
L'INVENTARIO AUTOMATICO DEI PRODOTTI
IN GENERICI ARMADI**

Relatore

Prof. Roberto Caracciolo

Laureando

Diego Santagiuliana Busellato

Correlatore

Ing. Roberto Guglielmi

Anno Accademico 2014/2015

Indice

1	Presentazione del progetto ed obiettivi della tesi	1
1.1	Lo Smart Stock Cabinet	1
1.2	Potenzialità del prodotto	2
1.3	Obiettivi e vincoli progettuali	3
1.4	Obiettivo della tesi	4
1.5	L'azienda Daint	4
2	Stato dell'arte	7
2.1	Gli Armadi "Intelligenti"	7
2.2	Ricerca di brevetti	11
2.3	Considerazioni	13
3	Sviluppo concettuale	15
3.1	Confronto con le soluzioni esistenti	15
3.2	Scelta della meccanica di movimentazione	19
3.3	Modello concettuale	24
3.4	Problematiche da affrontare	26
4	Robot paralleli cavo-guidati	29
4.1	Introduzione ai robot paralleli a cavi	29
4.2	Robot parallelo cavo-guidato operante su un piano	32
4.3	Studio generale di un robot a cavi	34
4.3.1	Cinematica diretta	36

4.3.2 Cinematica inversa.....	38
4.3.3 Analisi dinamica.....	39
5 Robot planare a quattro cavi.....	43
5.1 Pianificazione della traiettoria.....	44
5.2 Analisi cinematica inversa.....	46
5.2.1 Cinematica inversa di posizione.....	46
5.2.2 Cinematica inversa di velocità.....	48
5.2.3 Cinematica inversa di accelerazione.....	49
5.3 Studio dinamico.....	51
5.4 Implementazione dell'analisi.....	53
5.5 Robot con cavi convergenti nel centro di massa.....	60
5.6 Conclusioni.....	69
6 Robot planare a due cavi.....	71
6.1 Analisi cinematica e dinamica.....	72
6.2 Confronto robot 2 cavi vs. robot 4 cavi.....	74
6.3 Conclusioni e considerazioni.....	78
7 Scelta degli attuatori elettrici.....	81
7.1 I servomotori elettrici.....	81
7.1.1 Motore asincrono.....	82
7.1.2 Motore in corrente continua (standard).....	85
7.1.3 Motore brushless.....	89
7.1.4 Motore passo-passo.....	91

7.2 Scelta del motore.....	96
8 Ottimizzazione del moto.....	99
8.1 Vincoli sull'accelerazione dell'end-effector.....	99
8.2 Tempo minimo di percorrenza.....	104
8.3 Verifica di coppia dei motori.....	105
9 Dimensionamento dei componenti ed assemblaggio del prototipo.....	109
9.1 Schema generale della macchina.....	109
9.2 Gruppo porta antenna.....	111
9.3 Telaio.....	114
9.4 Scelta del motore passo-passo e dimensionamento dei rocchetti per l'avvolgimento dei cavi.....	115
9.5 Sistema passa-cavi.....	121
9.6 Pannelli di copertura e completamento della macchina.....	122
9.7 Quadro elettrico.....	126
10 Avvio della macchina e risultati conseguiti.....	129
10.1 Verifica del raggio dell'avvolgimento.....	129
10.2 Set-up della macchina.....	130
10.3 Prove e risultati.....	131
10.4 Considerazioni finali e sviluppi futuri.....	134
Appendice.....	135

Bibliografia.....141

Ringraziamenti.....143

Elenco delle figure

1.1 SELFMAT24.....	6
1.2 TOOLMAT24.....	6
1.3 ECOMAT24.....	6
2.1 Promedica cabinet.....	8
2.2 – 2.3 Applicazione etichetta RFID.....	9
2.4 - 2.5 Antenna RFID.....	9
2.6 Accesso controllato.....	9
2.7 – 2.8 Smart RFID cabinet XL.....	10
2.9 Accesso controllato.....	10
2.10 Tag.....	10
2.11 RFID-based intelligent storage cabinet and the management method thereof.....	12
2.12 – 2.13 Medical storage cabinet with RFID inventory.....	12
3.1 Schema a singola antenna fissa.....	16
3.2 Schema multi-antenna fisso.....	17
3.3 Schema a schiera traslante.....	17
3.4 Schema a singola antenna mobile.....	18
3.5 Trasmissione a cinghia.....	20
3.6 Vite a ricircolo di sfere.....	20
3.7 Ruota dentata – cremagliera.....	21
3.8 Robot SCARA.....	21
3.9 Robot parallelo.....	22

3.10 Robot a cavi.....	22
3.11 Montaggio lato interno.....	24
3.12 Pannello interno.....	24
3.13 Montaggio lato esterno.....	25
3.14 Pannello esterno.....	25
3.15 Configurazione con quattro motori.....	26
4.1 Schema della struttura del RoboCrane.....	31
4.2 Skycam.....	32
4.3 Configurazioni a) 4 e b) 2 cavi.....	33
4.4 Schema semplificato per il calcolo delle tensioni massime nei cavi.....	33
4.5 Scomposizione della tensione in un cavo.....	34
4.6 Schema geometrico di un generico robot a cavi.....	35
4.7 Rappresentazione vettoriale.....	36
4.8 Diagramma di corpo libero dell'end-effector.....	39
4.9 Diagramma di corpo libero di un rocchetto.....	40
5.1 Schema robot a quattro cavi.....	43
5.2 Traiettorie.....	44
5.3 Legge di moto polinomiale – grado 5.....	45
5.4 Schema dell'elemento terminale.....	47
5.5 Diagramma di corpo libero dell'elemento terminale.....	51
5.6 Riferimenti geometrici.....	55
5.7 Percorso.....	56
5.8 Velocità end-effector.....	57
5.9 Accelerazione end-effector.....	57

5.10 Velocità di rotazione dei motori 1 e 3.....	58
5.11 Tensione nel cavo 1.....	58
5.12 Tensione nel cavo 3.....	59
5.13 T1 in condizioni statiche.....	59
5.14 T3 in condizioni statiche.....	59
5.15 T1 in condizioni statiche.....	64
5.16 T3 in condizioni statiche.....	64
5.17 Tensione nel cavo 1.....	65
5.18 Tensione nel cavo 3.....	65
5.19 Coppia motore 1.....	66
5.20 Coppia motore 3.....	66
5.21 Influenza dello smorzamento viscoso.....	67
5.22 Influenza del parametro d_o	68
5.23 Influenza del parametro d_{v_sup}	68
6.1 Schema robot a due cavi.....	71
6.2 T1 in condizioni statiche.....	75
6.3 T2 in condizioni statiche.....	75
6.4 Tensione nel cavo 1.....	76
6.5 Tensione nel cavo 2.....	76
6.6 Coppia motore 1.....	77
6.7 Coppia motore 2.....	77
6.8 Confronto di coppie.....	77
7.1 Esempio di motore asincrono.....	82
7.2 Curva caratteristica del motore asincrono.....	83

7.3 Coppia in funzione della frequenza di alimentazione.....	84
7.4 Motore a corrente continua (magneti permanenti).....	85
7.5 Curva caratteristica del motore a magneti permanenti.....	86
7.6 Curva caratteristica del motore (a) eccitazione in parallelo e indipendente e (b) eccitazione in serie.....	87
7.7 Regione di funzionamento del motore ad eccitazione indipendente.....	88
7.8 Motore brushless.....	89
7.9 Regione di funzionamento del motore brushless.....	90
7.10 Motore passo-passo (ibrido).....	92
7.11 Curva di pull-out.....	95
8.1 Fascia di accelerazioni ammissibili.....	105
8.2 Pull-out torque del motore scelto.....	106
8.3 Accelerazione dell'end-effector.....	106
8.4 Andamento della velocità lungo il percorso dell'end-effector.....	107
8.5 Tensione nel cavo 2.....	107
8.6 Coppia richiesta al motore 2.....	108
8.7 Campo di funzionamento.....	108
9.1 Schema della parte meccanica.....	110
9.2 Schema della parte elettronica.....	111
9.3 Antenna RFID.....	112
9.4 Sub-assemblato porta-antenna; a) vista esplosa e b) porta-antenna assemblato.....	112
9.5 Porta antenna a) vista frontale e b) vista laterale.....	112
9.6 End.effector in materiale plastico.....	114
9.7 Telaio HxL = 1,5x2 m ²	115

9.8 Tensione nel cavo 1 in condizioni statiche.....	116
9.9 Curve di pull-out dei motori: a) PKP266D28A-L, b) PKP268D28A-L, c) PKP268U30A-L.....	118
9.10 Curva del raggio dell'avvolgimento in funzione della lunghezza del cavo..	119
9.11 Rocchetto di avvolgimento: a) vista esplosa, b) rocchetto assemblato.....	121
9.12 Modello solido del pannello (mancano cavi e copertura anteriore).....	122
9.13 Vista di dettaglio - gruppo motore-rocchetto.....	123
9.14 Porta-antenna RFID - versione 1.....	123
9.15 Porta-antenna RFID - versione 2.....	124
9.16 Confronto dei due porta-antenna.....	124
9.17 Componenti del rocchetto.....	124
9.18 Rocchetto assemblato.....	125
9.19 Motore passo-passo, rocchetto, passa-cavo.....	125
9.20 Pannello assemblato (manca copertura anteriore).....	126
9.21 Assemblaggio a) Embedded PC, b) Buffer Capacitor Terminal, c) driver 1, d) driver 2.....	127
9.22 Quadro elettrico.....	128
10.1 Variazione stimata del raggio di avvolgimento.....	130
10.2 Velocità di rotazione del motore 2.....	132
10.3 Coppia richiesta al motore 2.....	132

Elenco delle tabelle

7.1 Sequenza di comando one-phase-on.....	93
7.2 Sequenza di comando two-phase-on.....	94
7.3 Sequenza di comando half step.....	94
9.1 Tempo del ciclo di scansione totale al variare del raggio base dei rocchetti.....	120

CAPITOLO 1

PRESENTAZIONE DEL PROGETTO ED OBIETTIVI DELLA TESI

1.1 Lo *Smart Stock Cabinet*

L'idea consiste nel voler realizzare un sistema di lettura, mediante tecnologia RFID, in grado di compilare un inventario, in modo automatico ed in continuo aggiornamento, di oggetti stoccati in armadi, toolbox, scaffali, ecc. Questo sistema deve anche essere in grado di fornire un'indicazione più o meno dettagliata della posizione di ogni singolo oggetto contenuto nell'armadio. Si vuole progettare un modulo a sé stante da installare su armadi già esistenti per renderli "smart" (intelligenti).

Ipotizzando di dotare lo scaffale di un'interfaccia utente che consenta di selezionare l'oggetto da prelevare, lo *smart stock cabinet* permette di ridurre i tempi di ricerca ed ottimizza la gestione dello scaffale stesso.

L'obiettivo è quello di progettare un pannello, da fissare sul fondo o sulle porte dell'armadio (internamente o esternamente), che ospiti un'antenna RFID ed il sistema di movimentazione che le faccia coprire l'intera area di lettura. Ad ogni item stoccato dovrà essere assegnato ed attaccato un *tag* univoco che ne permetta l'identificazione. Il progetto ha luogo in collaborazione con l'azienda *Daint* di Castelgomberto (VI), specializzata nella progettazione e realizzazione di "*vending machines*" (distributori automatici).

1.2 Potenzialità del prodotto

Nelle aziende, ma anche in altri contesti, si devono spesso affrontare necessità di controllo in modo affidabile del contenuto di qualche tipo di contenitore (sia esso uno scaffale, un armadio, una toolbox, ecc.) e di assegnazione di strumenti ai dipendenti autorizzati. Ad esempio è spesso necessario verificare che un contenitore di attrezzi o un kit sia completo, oppure controllare il contenuto di un armadietto di medicinali.

Un inventario inesatto può comportare perdite di produttività e frequenti *out-of-stock* e la mancanza di informazione sulla locazione degli oggetti da prelevare può tradursi in una significativa perdita di tempo dovuta alla ricerca da parte degli operatori.

Rendere un armadio intelligente “*smart*” significa ottenere risparmi effettivi provenienti dall’eliminazione di:

- Monitoraggio manuale delle entrate e delle uscite, check-in/check-out;
- Tempo di ricerca per localizzare utensili o strumenti contenuti nella toolbox;
- Errore di calcolo del livello (quantità) di pezzi talvolta costosi.

Inoltre, l’impiego di uno *smart stock cabinet*, permette di soddisfare le seguenti esigenze:

- Conoscere il reale ed attuale contenuto del box;
- Verificare una desiderata configurazione del contenuto;
- Identificare l’utente che interagisce con il *cabinet* e monitorare il prelievo ed il deposito;
- Mantenere una storia dell’oggetto, ad esempio osservando per quanto tempo è rimasto all’interno dell’armadio;
- Fornire ulteriori informazioni, ad esempio date di scadenza, giorno e ora di deposito/prelievo;
- Rendere il contenuto corrente dell’armadio disponibile per l’accesso remoto;
- Gestire in modo efficiente prodotti del tipo “*first in first out*” (FIFO).

1.3 Obiettivi e vincoli progettuali

Come precedentemente indicato, l'idea di base è progettare un modulo da installare su box già esistenti e che sia percepito, a livello tecnico e commerciale, come un miglioramento delle funzionalità dell'armadio. Questo si traduce in alcuni semplici obiettivi da tenere a mente durante l'intero sviluppo del progetto:

- *Minimo ingombro*: deve essere minimo lo spazio sottratto allo stoccaggio;
- *Certezza sulla lettura* (e quindi sul contenuto dell'armadio): l'antenna RFID deve essere in grado di raggiungere e leggere l'intera area dichiarata, non devono rimanere "zone d'ombra" in seguito alla scansione;
- *Invarianza del "modus operandi"*: l'installazione del pannello non deve stravolgere il lavoro di chi interagisce con l'armadio/scaffale; l'operazione di prelievo deve essere agevolata;
- *Flessibilità*: il modulo deve essere facilmente adattabile al maggior numero di armadi senza quindi implicare una riprogettazione;
- *Costi contenuti e ritorno economico*: l'acquisto del pannello non deve essere economicamente rilevante e deve significare un investimento per ridurre i costi legati ai tempi spesi nella ricerca degli strumenti/oggetti e nella compilazione dell'inventario. Inoltre, monitorando continuamente il movimento degli item, si riduce sensibilmente il numero degli smarrimenti.

1.4 Obiettivo della tesi

Questa tesi si propone pertanto di trovare e sviluppare un'appropriata soluzione di movimentazione meccanica di un'antenna RFID, al fine di rispettare al meglio i vincoli e gli obiettivi progettuali sopra esposti.

Si intraprenderà quindi uno studio sulla fattibilità del progetto proposto, individuando una possibile configurazione e valutandone le prestazioni ed i costi. Seguirà poi la progettazione di un primo prototipo mediante modellazione solida con il successivo assemblaggio e la sperimentazione di un prototipo fisico funzionante.

Visto l'ambito di provenienza, lo scrivente affronterà in particolar modo l'aspetto meccanico del problema, pervenendo alla scelta ed al dimensionamento degli attuatori de sistema. Questo lavoro si pone comunque all'interno di un mondo, come l'automazione, che inevitabilmente si scontra quotidianamente con problematiche di tipo elettronico; saranno pertanto trattate, seppur marginalmente, anche questioni legate all'elettronica ed ai controlli automatici.

All'interno della realtà aziendale il progetto si propone di portare un contributo sia a livello professionale, intraprendendo la strada dello sviluppo di questo progetto "nuovo" per l'azienda, sia a livello di innovazione in termini di idee e tecnologia. La presenza in azienda e l'affiancamento con il suo personale consentiranno di sviluppare il progetto non soltanto dal punto di vista modellistico ed accademico, bensì pervenendo ad una concreta realizzazione prototipale.

1.5 L'azienda Daint

DAINT srl è un'azienda nata dieci anni fa a Castelgomberto (VI), Leader nella produzione di distributori automatici "senza spirale" che sono in grado di erogare prodotti di qualsiasi dimensione sia tradizionali che hi-tech. I settori che meglio possono adottare questo innovativo sistema di *self sell* sono gli ospedali, farmacie, librerie, aree di servizio, parchi dei divertimenti, enoteche, porti

marittimi, aeroporti, centri storici, musei, condomini, villaggi turistici, camping, parchi e grandi aziende.

La continua evoluzione del mercato crea la richiesta di nuovi strumenti dedicati alle normali esigenze della persona. Diventa pubblica utilità il fatto di poter scegliere ed acquistare, a qualsiasi ora, prodotti di vario genere. La Daint si occupa di distributori automatici di nuova concezione, è un'azienda fortemente orientata all'evoluzione tecnologica, tanto da essere depositaria di brevetti internazionali del settore. In particolare la Daint realizza distributori automatici in grado di:

- Erogare qualsiasi tipo di prodotto;
- Essere collegati con il mondo (INTERNET);
- Dialogare con il cliente (SMS).

I prodotti DAINT sono tutti dotati di un sistema automatizzato che dà loro il valore aggiunto: "l'intelligenza".

L'azienda ha organizzato un nucleo di tecnici e aziende specializzate nel settore per poter offrire al mercato prodotti estremamente specialistici, in grado di competere con i prodotti dei maggiori concorrenti mondiali. Questo le consente, di progettare e costruire con particolare cura dall'estetica, alla semplicità d'uso. Inoltre la Daint dedica importanti risorse alla gestione del post-vendita, che in questo segmento di business si rileva essere un reparto strategico. La struttura aziendale è formulata in modo da utilizzare il più possibile l'*outsourcing*. Le procedure di gestione e produzione industriale aziendali rispettano le indicazioni del sistema di qualità.

Alcuni esempi di *vending machines* realizzate sono:

- **SELFMAT24:** è una vetrina totalmente automatica in grado di erogare prodotti di diversa forma e natura, confezionati in blister, in sacchetto, a forma regolare o irregolare (fig. 1.1).



Figura 1.1: SELFMAT24



Figura 1.2: TOOLMAT24

- **TOOLMAT24:** è un sistema di gestione, controllo e distribuzione di materiale di consumo con particolare attenzione agli utensili per l'asportazione di truciolo (fig. 1.2).
- **ECOMAT24:** è un sistema di gestione, controllo e distribuzione di: rotoli di film bio, mater-bi, sacco riciclato, sacchi di carta, sacchi con bar-code, sacchi con transponder o semplici kit misti di più tipologie per la raccolta differenziata (fig. 1.3).



Figura 1.3: ECOMAT24

CAPITOLO 2

STATO DELL'ARTE

Prima di cimentarsi nell'attività di “pensiero creativo”, per tentare di capire come realizzare un nuovo progetto, è doveroso confrontarsi con quello che già esiste, se c'è, al fine di raccogliere degli input e degli spunti, ma anche per non ricadere in brevetti e progetti già realizzati. Quest'opera di ricerca è altresì importante per individuare delle mancanze nelle soluzioni già esistenti e per assicurarsi di immettersi fin da subito nella giusta direzione di sviluppo dell'idea del prodotto che si vuole realizzare.

Si è dunque svolta una generale ricerca bibliografica volta ad individuare e studiare armadi e/o sistemi in grado di identificare il proprio contenuto in modo automatico.

2.1 Gli Armadi “Intelligenti”

Si è trovato che esistono già degli *smart cabinet* che, oltre ad ospitare una certa tipologia di oggetti, svolgono autonomamente la compilazione dell'inventario e lo mantengono aggiornato periodicamente, o in tempo reale.

Le tre principali applicazioni di questi armadi “intelligenti” sono:

- Ambiente ospedaliero: armadietti per medicinali;
- Ambiente industriale: armadi porta utensili;
- Stoccaggio di materiali ad alto valore.

In tutti gli esempi trovati si impiega la tecnologia RFID (*Radio-Frequency IDentification*), quindi vi sono uno o più ricevitori (antenne) che captano e

leggono il segnale emesso dai TAG attaccati sugli item contenuti nell'armadio. Questa tecnologia si basa “...sulla capacità di memorizzazione di dati da parte di particolari etichette elettroniche, chiamate tag (o anche transponder), e sulla capacità di queste di rispondere all'interrogazione a distanza da parte di appositi apparati fissi o portatili, chiamati reader (o anche interrogator). Questa identificazione avviene mediante radiofrequenza, grazie alla quale un reader è in grado di comunicare e/o aggiornare le informazioni contenute nei tag che sta interrogando; infatti, nonostante il suo nome, un reader (ovvero: "lettore") non è solo in grado di leggere ma anche di scrivere informazioni.” (da Wikipedia).

Si riportano di seguito due esempi di armadio intelligente incontrati:

1. *Promedica Cabinet* (Promedica Bioelectronics s.r.l.), ambito ospedaliero;
2. *Smart RFID Cabinet XL* (Nexess), armadio industriale porta utensili.

Promedica Cabinet

Gli armadi *Promedica* sono concepiti per una gestione facile ed automatica dei presidi ospedalieri di alto valore che sono custoditi nelle sale di interventistica, nelle sale operatorie e nei reparti specialistici. Il sistema, utilizza la tecnologia RFID per tracciare e gestire ogni tipo di presidio.

Una piccola etichetta RFID viene applicata ad ogni scatola del presidio ed il suo codice identificativo univoco (una stringa di lettere e numeri) viene legato alla descrizione del prodotto tramite un Software basato sul web che registra tutte le caratteristiche del prodotto, inclusa la data di scadenza.



Figura 2.1: *Promedica Cabinet*



Figure 2.2-2.3: Applicazione Etichetta RFID

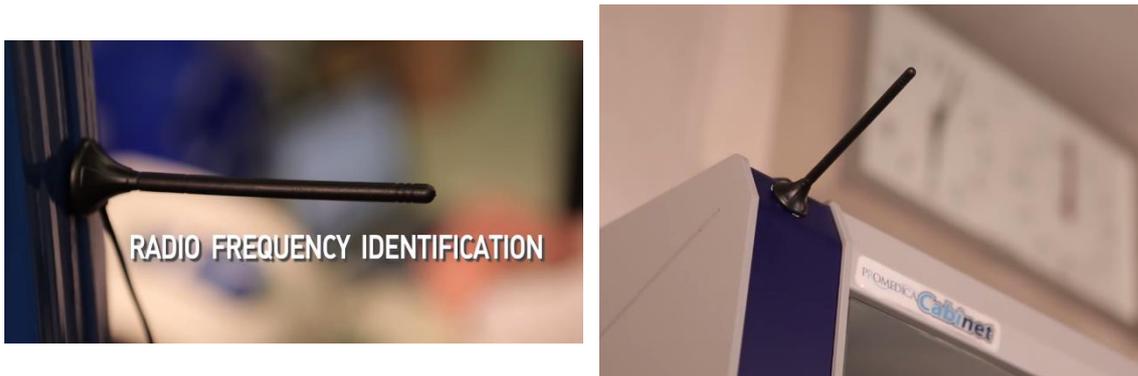


Figure 2.4-2.5: Antenna RFID

L'armadio legge tutte le etichette RFID applicate su ogni prodotto e fornisce un rapporto sul contenuto ogni 15 minuti. Questo, insieme al controllo delle scadenze, permette di ottimizzare l'uso dei prodotti, evitando perdite di tempo (controlli ripetuti) e denaro (materiali scaduti).

L'armadio utilizza una frequenza di 13,56 MHz, l'unica consentita all'interno di sale da interventistica ed operatorie. Questa frequenza non interferisce con gli apparecchi operanti in questi ambienti. L'armadio può essere dotato di porte in vetro, con o senza bloccaggio magnetico. Se bloccate magneticamente, le porte debbono essere aperte tramite tessere in dotazione al personale, permettendo un controllo degli accessi ai materiali.

Il Software permette ogni tipo di statistica relativa al consumo dei prodotti, consentendo un utilizzo più efficace ed un controllo delle scadenze. Il software permette inoltre qualsiasi statistica relativa



Figura 2.6: Accesso Controllato

all'utilizzo ed al turn over di ogni prodotto, consentendo una gestione più attenta dei materiali ed una migliore gestione degli spazi.

Smart RFID Cabinet XL

Lo *Smart RFID Cabinet XL* permette, come nell'esempio precedente, un inventario automatico. In questo caso l'armadio è adibito al contenimento di utensili e sfrutta una tecnologia UHF (*Ultra High Frequency*) RFID.



Figura 2.7: Smart RFID Cabinet XL

Sostanzialmente questo armadio porta-utensili è del tutto analogo al precedente: presenta un controllo degli accessi, permette il controllo dei materiali ed il monitoraggio remoto. Inoltre presenta un'interfaccia utente touch-screen, utile per controllare direttamente l'inventario e le transizioni avvenute. Questa volta però i tag non sono delle strisce adesive ma degli elementi da fissare come illustrato in *Figura 2.10*.



Figura 2.8: Smart RFID Cabinet XL



Figura 2.9: Accesso Controllato

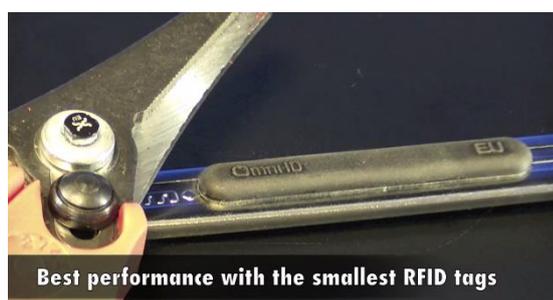


Figura 2.10: Tag

I due esempi appena descritti rappresentano la grande maggioranza degli Armadi Intelligenti ma ne esistono altre varianti. Sostanzialmente si possono trarre le seguenti osservazioni:

- Tutte le soluzioni esistenti presentano una o più antenne RFID che sono adibite alla lettura di tutti i tag presenti all'interno del box;
- Le funzioni primarie richieste sono: compilazione affidabile ed automatizzata dell'inventario, controllo degli accessi, gestione remota;
- Gli Armadi Intelligenti "nascono intelligenti", ovvero non esiste un modulo a sé stante che possa essere acquistato e installato su un generico box, già posseduto dal cliente, per renderlo *smart*;
- I sistemi RFID impiegati non permettono di ottenere informazioni sulla locazione degli oggetti stoccati (si sa solo se "c'è o non c'è"), a meno che ogni oggetto non debba occupare sempre una precisa posizione e, al momento del deposito, l'utente si accerti di inserirlo esattamente nello spazio ad esso adibito. In questo caso, ciascun tag dovrà anche contenere l'informazione di posizione unitamente a quella identificativa dell'oggetto.

2.2 Ricerca di Brevetti

Un'altra strada per la valutazione dello stato dell'arte è sicuramente rappresentata dalla ricerca di brevetti. E' importante verificare se esistono soluzioni al problema che si sta studiando, già brevettate, in primo luogo per non cadere in condizioni di dover pagare per dei diritti intellettuali, e in seconda battuta per magari imbattersi in idee già realizzate e di libero dominio. A tal fine è stata condotta una ricerca on-line di brevetti con le parole chiave: inventario, inventario automatico, armadi intelligenti, tecnologia RFID per inventario, tecnologia RFID. Come riscontrato precedentemente, la maggior parte delle applicazioni ricadono in ambito ospedaliero, con armadi per medicinali e attrezzatura medica. Tutti i brevetti si riferiscono ad armadi appositamente progettati per un controllo automatico del contenuto con tecnologia RFID ed in quasi tutte le soluzioni si impiegano una o più antenne RFID fisse.

Un esempio interessante è un brevetto americano (*US8704642(B2) - RFID-BASED INTELLIGENT STORAGE CABINET AND THE MANAGEMENT METHOD THEREOF, fig. 2.11*) nel quale si descrive un box intelligente, ad

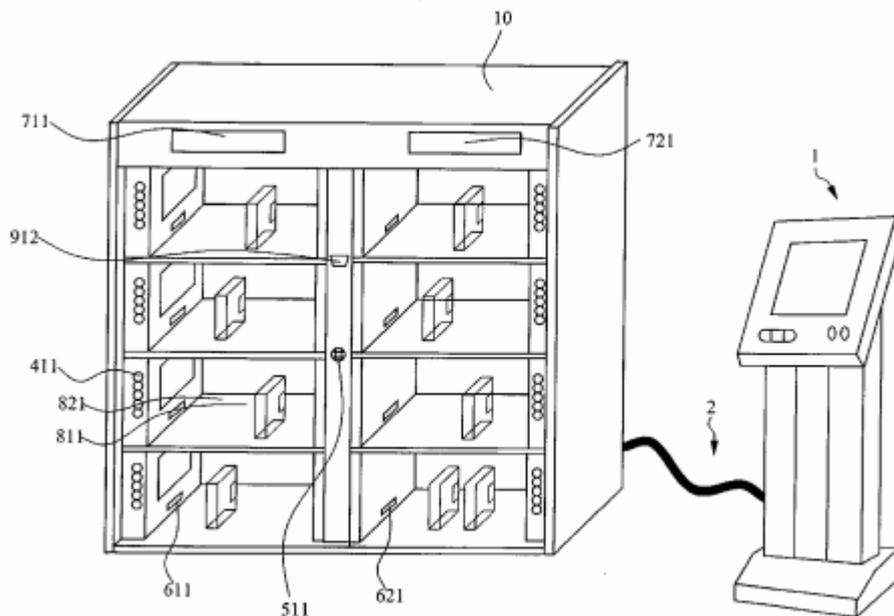


Figura 1.11: RFID-BASED INTELLIGENT STORAGE CABINET AND THE MANAGEMENT METHOD THEREOF

accesso controllato e con interfaccia utente, che viene gestito a compartimenti/celle. In ogni cella sono presenti un ricevitore RFID ed altri sensori che, oltre alla possibilità di controllo e monitoraggio degli item contenuti, permettono anche di sapere la locazione (compartimento) di ogni oggetto.

In particolare esiste poi un brevetto che si distingue dagli altri per il fatto di introdurre un sistema mobile di scansione. Nel brevetto in questione

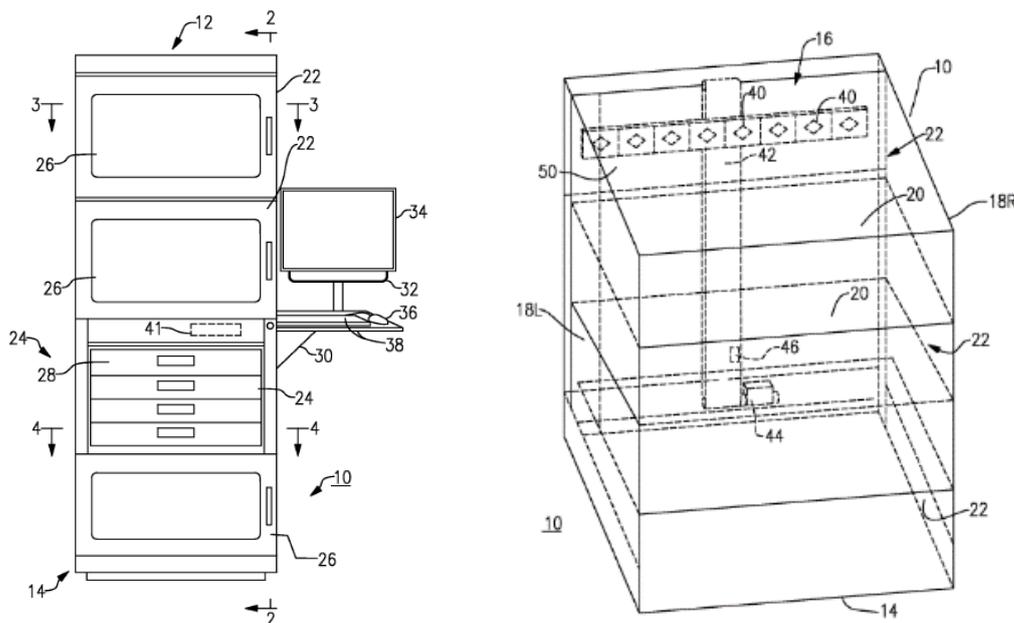


Figura 2.12-2.13: Medical Storage Cabinet with RFID Inventory

(US8770479 (B1) - MEDICAL STORAGE CABINET WITH RFID INVENTORY), come illustrato nelle *figure 2.12, 2.13*, un'asse motore-puleggia-cinghia impone una traslazione verticale ad una schiera di antenne RFID permettendole la lettura dell'intero spazio. Per il resto, questo box è analogo agli altri ed il brevetto non fa riferimento al fatto di poter fornire informazioni riguardo la posizione degli oggetti identificati.

2.3 Considerazioni

In seguito alla valutazione di quello che è ad oggi lo stato dell'arte nell'ambito della compilazione automatizzata dell'inventario di un armadio è facile rendersi conto che non esiste un prodotto modulare che assolva alla sola funzione di lettura ed identificazione degli oggetti e che conferisca, con la sua installazione, "l'intelligenza" ad un normale armadio.

È pertanto giustificata l'idea proposta in questa tesi: sviluppare una soluzione modulare in grado di adattarsi ad una vasta gamma di armadi con costi di produzione ed installazione contenuti, ed accettata dal mercato di riferimento.

CAPITOLO 3

SVILUPPO CONCETTUALE

In questo capitolo si percorre il passaggio dall'idea generica di partenza (un ipotetico sistema in grado di identificare e localizzare gli item contenuti nel box) ad uno schema iniziale del prototipo stabilendone le principali caratteristiche di forma e di funzionamento.

3.1 Confronto con le soluzioni esistenti

L'input a monte ricevuto dall'azienda indirizza a realizzare un pannello all'interno del quale muovere un'unica antenna RFID in grado di coprire l'intera area di scansione.

Durante le ricerche condotte sullo stato dell'arte si è visto però che la maggior parte delle soluzioni proposte impiegano un sistema di lettura costituito da una o più antenne che lavorano rimanendo fisse. L'unico esempio che ammette una lettura in movimento presenta una schiera di *readers* che compie una semplice traslazione verticale.

Ciò che ha portato ad ipotizzare un'unica scheda (antenna) che lavori spostandosi su un piano verticale si basa su considerazioni inerenti a costi, flessibilità e capacità di stabilire la posizione del singolo oggetto. Ragionando con questi criteri si possono individuare delle criticità nelle soluzioni proposte dallo stato dell'arte:

- Lettura mediante unica antenna fissa;
- Impiego di più antenne fisse;
- Traslazione verticale di una schiera di antenne.

Lettura mediante unica antenna fissa:

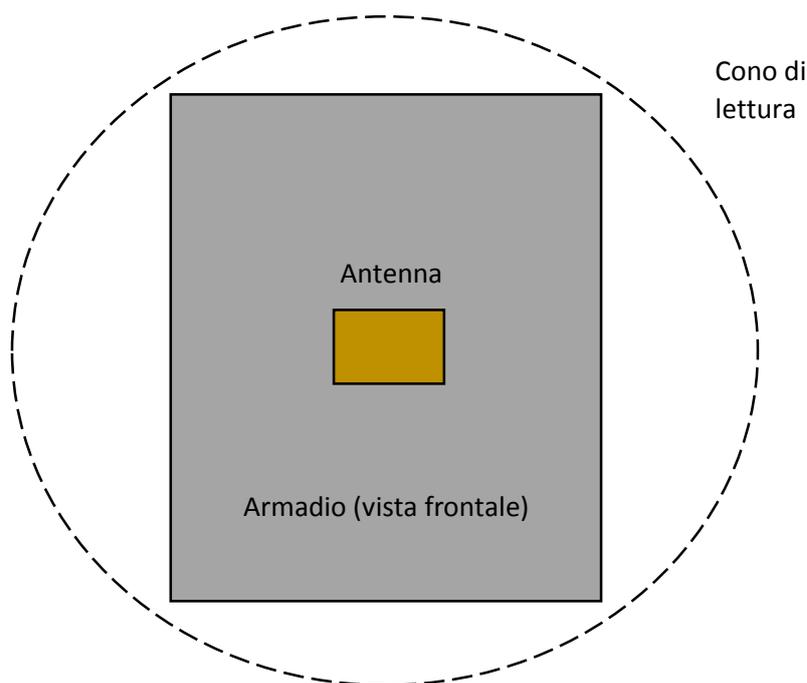


Figura 3.1: Schema a singola antenna fissa

- L'antenna deve essere in grado di coprire l'intero spazio del box e deve saper distinguere tutti gli oggetti; questo comporta un maggior costo legato alla potenza di lettura in termini di spazio leggibile e algoritmi anticollisione implementati per riuscire a distinguere tutti i tag;
- La scelta della potenza dell'antenna dipende dalle dimensioni dell'armadio;
- Non c'è la possibilità della localizzazione degli oggetti, a meno che essi non vengano sempre collocati nel medesimo scompartimento.

Impiego di più antenne fisse:

- Si utilizzano più antenne meno potenti del caso precedente;
- Le dimensioni del box influenzano il numero di antenne necessarie;
- Si può ricavare un'informazione di locazione in base a quale antenna rileva il segnale del tag dell'oggetto interessato; più grande è il numero di readers, a parità di dimensioni del box, e maggiore è la risoluzione.

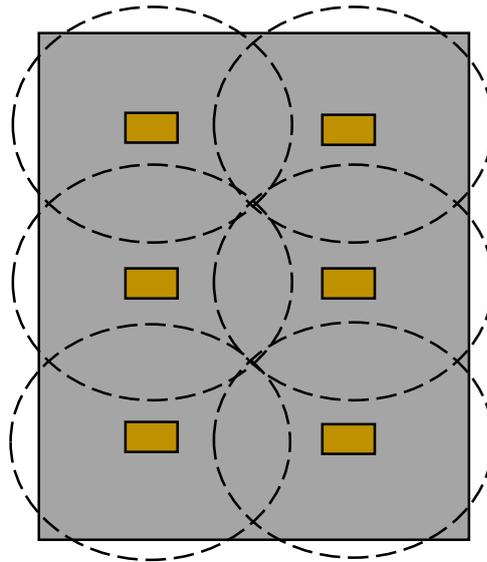


Figura 3.2: Schema multi-antenna fisso

Traslazione verticale di una schiera di antenne:

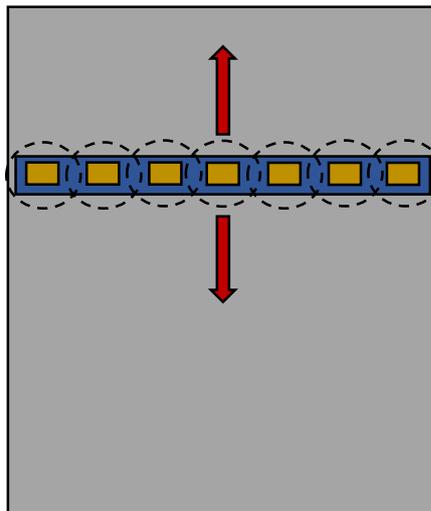


Figura 3.3: Schema a schiera traslante

- Come nel caso precedente le antenne impiegate necessitano di una potenza inferiore rispetto al caso di singolo reader;
- Si ha comunque un legame tra numero di antenne e dimensioni dell'armadio (in particolare la larghezza);

- E' possibile legare il ripiano sul quale è appoggiato il singolo oggetto alla coordinata verticale registrata nel momento in cui il reader riceve il segnale del tag.

Se si ritiene che la possibilità di conoscere la posizione di ogni item, in modo più o meno dettagliato, sia una caratteristica che non può mancare nel prodotto che si vuole realizzare, allora si scarta automaticamente l'opzione di unica antenna fissa. Per quanto riguarda una configurazione multi-antenna, sia essa fissa o a schiera mobile, si rimane sempre vincolati alle dimensioni dell'armadio rischiando di scontrarsi con costi eccessivi quando si ha a che fare con box di grandi taglie che necessitano di un gran numero di readers.

Se, in alternativa alle soluzioni sopra analizzate, si opta per la movimentazione di un'unica scheda di lettura, si possono ottenere dei benefici in termini di costi e flessibilità qualora si riesca ad individuare la giusta meccanica di movimentazione che non sia troppo influenzata dalle dimensioni dell'armadio.

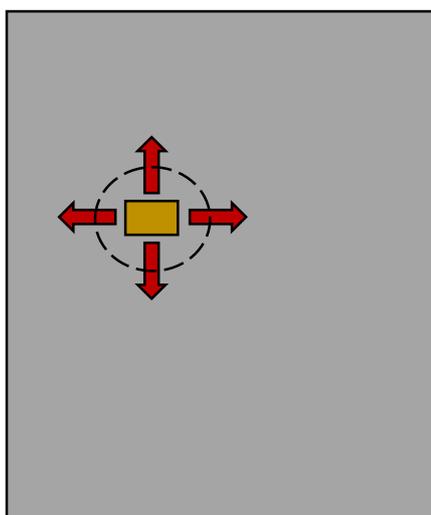


Figura 3.4: Schema a singola antenna mobile

In quest'ottica la precisione e risoluzione sulla posizione degli oggetti dipendono dall'estensione del cono di lettura dell'antenna la quale ha un duale effetto: più ristretto è il cono di lettura e più grande è la risoluzione, e quindi la precisione, ma maggiore sarà il tempo necessario per coprire, con il movimento, l'intera area da scansionare.

Quest'ultimo aspetto relativo al tempo (necessario ad una scansione completa) è rilevante nel momento in cui si immagina a come dovrebbe lavorare il sistema.

Ipotizzando di introdurre un controllo degli accessi (come suggerito dalle applicazioni), ogni qualvolta un utente richiude l'armadio in seguito ad un operazione di prelievo/deposito, le porte si bloccano e contemporaneamente si attiva la meccanica che mette in movimento l'antenna, la quale registrerà i depositi/prelievi avvenuti ed aggiornerà la posizione di ogni item. Se in questo momento un ulteriore utente si identifica per avere accesso al box, egli dovrà attendere il compimento della scansione. È quindi evidente che l'intervallo di tempo richiesto per l'operazione di lettura deve essere il più ristretto possibile. Si dovrà quindi, nella fase di scelta del reader RFID che si affronterà più avanti, valutare un buon compromesso delle due prestazioni di tempo e risoluzione.

3.2 Scelta della meccanica di movimentazione

Nel paragrafo precedente si è giustificata la scelta di una configurazione a singola antenna mobile. A questo punto occorre stabilire in che modo realizzare il movimento ricercando una soluzione che meglio soddisfi gli obiettivi descritti nel capitolo 1. In particolare i principali *driver* per orientarsi nella scelta della meccanica di movimentazione sono:

- Minimo ingombro;
- Flessibilità di applicazione;
- Costi contenuti.

L'applicazione studiata richiede spostamenti che si mantengono all'interno di un piano. Presupponendo fin da subito un'attuazione di tipo elettrico, si possono confrontare le seguenti opzioni di movimento:

- **MOVIMENTO CARTESIANO**
Prevede due assi elettrici, quindi due motori, che lavorano nelle due direzioni orizzontale e verticale. Una traslazione rettilinea in una direzione è realizzabile mediante:

- *Trasmissione a cinghia;*
 - *Trasmissione con vite a ricircolo di sfere;*
 - *Sistema ruota dentata – cremagliera.*
-
- **MOVIMENTO PILOTATO DA ROBOT**
Un robot generalmente presenta un elemento di presa che viene movimentato da una struttura controllata da più attuatori (usualmente da 3 a 6). I robot di interesse sono:
 - *Robot SCARA;*
 - *Robot parallelo;*
 - *Robot a cavi.*

Trasmissione a cinghia (dentata):

Un motore pone in rotazione una puleggia che a sua volta movimentata una cinghia alla quale è fissato l'elemento da traslare. Questa soluzione è poco costosa ma è influenzata dall'elasticità intrinseca della cinghia che comporta oscillazioni e quindi incertezza sulla posizione. Un diffuso impiego si riscontra negli assi di pallettizzatori di tipo cartesiano.

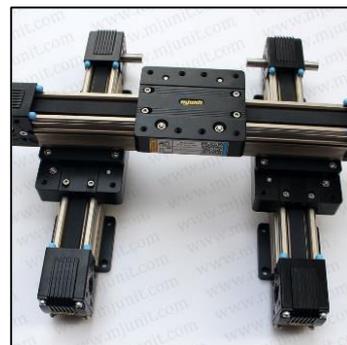


Figura 3.5: Trasmissione a Cinghia

Trasmissione con vite a ricircolo di sfere:



Figura 3.6: Vite a Ricircolo di Sfere

Il motore ruota una vite sulla quale scorre una chiocciola grazie all'accoppiamento vite-madrevite convertendo così il moto rotatorio in moto lineare. Alla chiocciola è fissato il carico da muovere ed in essa sono contenute delle sfere che compiono un moto di rotolamento attorno all'asse della vite. In questo caso la precisione ed il rendimento sono molto elevati ma il costo della vite è piuttosto

alto. Grazie alla grande precisione garantita, la vite a ricircolo di sfere è molto utilizzata per la trasmissione del moto sulle macchine utensili.

Sistema ruota dentata – cremagliera:

Questo ingranaggio lineare converte il moto rotatorio in moto lineare. Il movimento avviene sfruttando l'accoppiamento fra i denti di una ruota dentata e di una cremagliera: girando, la ruota riceve la spinta in avanti. I principali impieghi sono: sistemi di sollevamento, macchine utensili e viene anche usato come terza rotaia in ferrovie a forte pendenza.

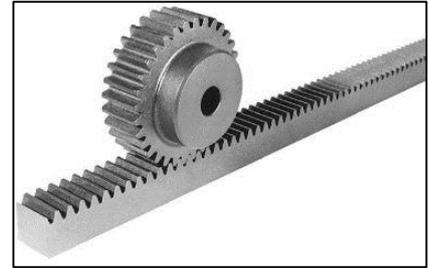


Figura 3.7: Ruota Dentata - Cremagliera

Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm):



Figura 3.8: Robot SCARA

Questo robot muove un braccio meccanico su un piano ed una presa può traslare nella direzione ortogonale. Vi sono quattro assi e quattro gradi di libertà. Il primo e secondo asse ruotano le due parti articolate del braccio. All'estremità libera si trova la presa che può muoversi sia nella direzione ortogonale che ruotare attorno al proprio asse. Il robot SCARA è concepito per operazioni veloci e precise e per questo motivo viene impiegato nei montaggi in serie.

Robot parallelo:

Il manipolatore parallelo è in genere costituito da due piattaforme di cui una fissa, detta base, ed una mobile, che è l'elemento terminale. Le piattaforme sono tra

loro connesse tramite gambe, ciascuna collegata ad un attuatore. Questa tipologia di robot presenta i seguenti vantaggi:

- Elevato rapporto tra carico pagante e peso della struttura;
- Elevata accuratezza di posizionamento;
- Elevata velocità;
- Elevata rigidità;
- Possibilità di attuazione fissa sulla base.



Figura 3.9: Robot Parallelo

Gli svantaggi del manipolatore parallelo sono da imputarsi a:

- Spazio di lavoro limitato, relativamente alle dimensioni del manipolatore;
- Presenza di configurazioni singolari all'interno dello spazio di lavoro;
- Complessa analisi cinematica.

Come lo SCARA, il robot parallelo è più spesso usato per fini industriali, soprattutto nei montaggi di serie ed assemblaggio di circuiti stampati.

Robot a cavi:

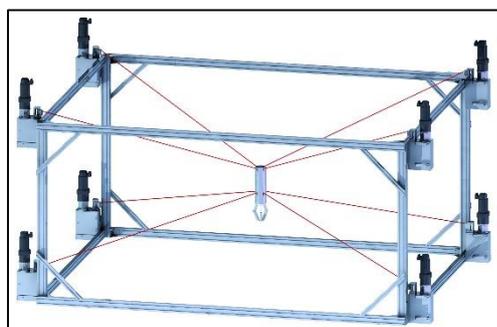


Figura 3.10: Robot a Cavi

Il robot a cavi è un tipo di robot parallelo in cui l'elemento terminale è sostenuto da cavi anziché da gambe rigide. Questo rende ancora più interessante il rapporto fra carico pagante e peso del robot. Ogni cavo viene svolto/avvolto da un motore e, per il corretto funzionamento della macchina, deve mantenere sempre una tensione positiva. Il grosso vantaggio rispetto al tradizionale robot parallelo è rappresentato da un più ampio spazio di lavoro raggiungibile. Inoltre, finché la massa dei cavi può essere ritenuta trascurabile o comunque poco influente, le accelerazioni raggiungibili risultano maggiori. Alcuni campi di applicazione del robot cavo-guidato sono: ripresa aerea in strutture sportive (*spidercam*),

riabilitazione, assemblaggio, movimentazione di materiali potenzialmente pericolosi.

Tra le varie possibilità appena descritte di realizzazione del movimento, a partire da un'attuazione elettrica, si ricerca a questo punto quella che rappresenta la miglior opzione per l'applicazione di interesse.

Tra i sistemi di tipo cartesiano, la soluzione a cinghia è sicuramente quella meno costosa e, sebbene sia anche la meno precisa, l'eventuale errore di posizione, conseguente a movimenti repentini accoppiati all'elasticità della cinghia stessa, non influirà sul corretto funzionamento della macchina.

Ponendo invece l'attenzione sui sistemi robot è immediato scartare l'alternativa rappresentata dal robot parallelo di tipo tradizionale. Infatti il parallelo, anche se progettato per lavorare su un solo piano, occupa uno spazio troppo grande in relazione a quello disponibile all'interno di un armadio. Se poi si fa il confronto fra lo SCARA ed il robot cavo-guidato, quest'ultimo è sicuramente più interessante se si valutano ingombri, flessibilità e costi. Dal punto di vista dello spazio occupato, il robot a cavi è l'ideale per lavorare all'interno di un pannello che deve essere il più sottile possibile in quando, posti i motori sui bordi, all'interno dell'area di lavoro lo spessore del modulo si limita a rispettare l'ingombro dei cavi e dell'antenna che si deve movimentare. Dal lato costi, quello del meccanismo a cavi è determinato sostanzialmente dai soli motori, mentre nel braccio SCARA si aggiungono quelli relativi agli elementi (*link*) rigidi. Infine, parlando di flessibilità, cioè di facilità all'adattamento del meccanismo ad armadi di diversa taglia, impiegando un robot cavo-guidato si riesce a lavorare su differenti dimensioni semplicemente allungando od accorciando le lunghezze dei cavi. Questo non è altrettanto agevole con un robot SCARA poiché, passando da un armadio all'altro si dovrebbero riprogettare le parti che costituiscono il braccio articolato.

Portando avanti il confronto con i sistemi cartesiani, è sempre sulla questione della flessibilità applicativa che si perviene ad una soluzione a cavi. A parità di telaio, il quale dovrà comunque essere sempre adattato alle diverse dimensioni richieste dall'applicazione, un meccanismo di tipo cartesiano presenterà ogni

volta delle guide, verticali e orizzontali, che dovranno essere allungate od accorciate e questo non accade se si opta per un robot a cavi.

A valle di questa selezione rimane quindi la soluzione a cavi che pertanto costituirà la meccanica di movimentazione del modulo di scansione RFID.

3.3 Modello concettuale

È già possibile in questa fase farsi un'idea di come dovrà essere il sistema. Si è infatti in grado di stilare una prima distinta dei componenti necessari e non è difficile immaginarne un possibile assemblaggio.

Non è stato però ancora ben definito come questo pannello interagirà con il box sul quale verrà installato. La soluzione più agevole sarebbe fissare il modulo alla parete posteriore dell'armadio dal lato esterno così da non sottrarre spazio utile per lo stoccaggio degli oggetti. È doveroso però tenere a mente che la tecnologia RFID incontra dei problemi quando tra il tag ed il reader si trova interposto qualcosa di metallico. Infatti, la presenza di metallo può causare fenomeni di riflessione o diffrazione che creano disturbo alla lettura. Considerando che gran parte dei box esistenti sono costituiti da lamiere metalliche, l'installazione lato esterno non si rivela in questi casi una via percorribile. Ci si vede quindi costretti a posizionare la macchina internamente

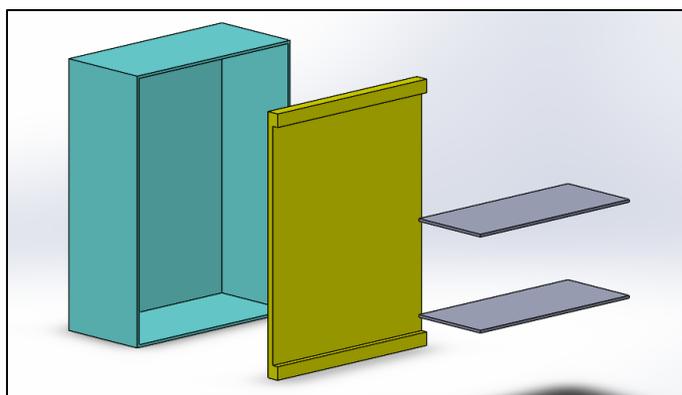


Figura 3.11: Montaggio Lato Interno

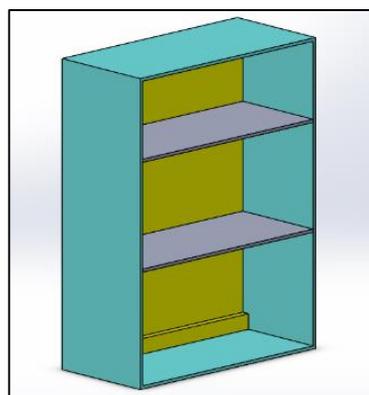


Figura 3.12: Pannello Interno

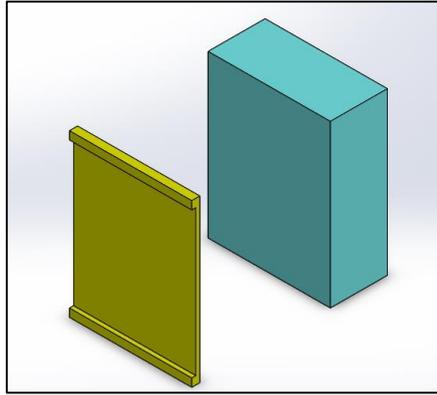


Figura 3.13: Montaggio Lato Esterno

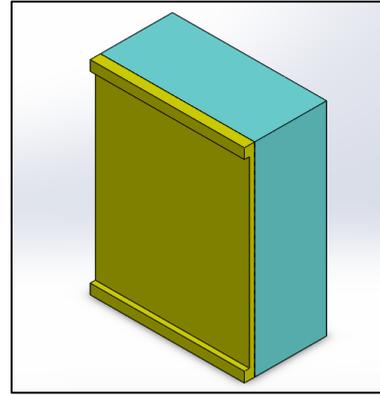


Figura 3.14: Pannello Esterno

all'armadio, fissandola alla parete di fondo e adattando i ripiani accorciandoli dello spessore sottratto. Nel caso in cui il box sia realizzato in altro materiale, sarà allora possibile lavorare sul lato esterno.

Il modulo, sia esso montato esternamente o internamente, comprenderà sicuramente un'antenna RFID che dovrà compiere dei percorsi su un piano verticale rimanendo entro un'area rettangolare con altezza e larghezza circa quelle dell'armadio. Avendo optato per l'impiego di un robot cavo-guidato, servirà un certo numero di motori o motoriduttori che comanderanno l'avvolgimento e lo svolgimento di altrettanti rocchetti e altrettanti cavi collegati ad un elemento porta-antenna. Per ridurre al minimo gli ingombri, antenna e porta-antenna si muoveranno all'interno di un intercapedine generata accostando due pannelli di copertura opportunamente distanziati. I due pannelli assolveranno anche la funzione di bloccare lo spostamento del gruppo antenna in direzione ortogonale al piano di lavoro. I gruppi motore (o motoriduttore) e rocchetto saranno posizionati in corrispondenza dei bordi dell'intercapedine. Un telaio, visivamente simile a quello di una finestra, dovrà: conferire rigidità alla struttura, sostenere i motori, mantenere distanziati i pannelli e prevedere un ancoraggio all'armadio. Una possibile configurazione dell'intero modulo è illustrata in *Figura 3.15* dove si è ipotizzato l'impiego di quattro motori. La zona perimetrale a strisce rosse serve ad indicare che quell'area è difficilmente raggiungibile dal reader e pertanto non è ivi garantita la lettura.

Oltre a quello già precedentemente elencato si dovrà tener conto di: componenti elettronici di controllo, sensori di posizione e/o per la ricerca dello zero macchina, passa-cavi e cavi vari di alimentazione e dati.

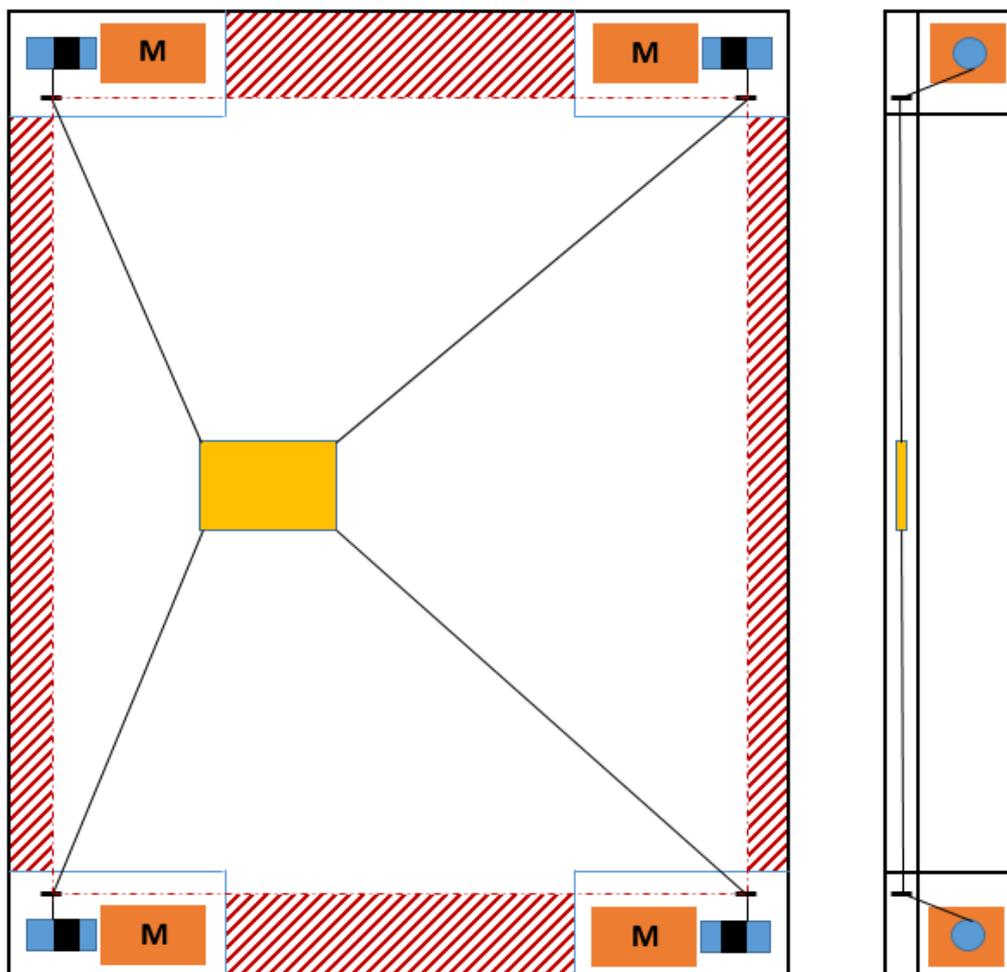


Figura 3.15: Configurazione con Quattro Motori

3.4 Problematiche da affrontare

Nel paragrafo precedente è stato definito a grandi linee come dovrebbe essere strutturato il modulo che si sta progettando. A questo punto sorgono spontanee delle questioni e delle problematiche che dovranno essere discusse e risolte:

- Stabilire la configurazione del robot, ovvero individuare il numero di motori e cavi da impiegare per riuscire a conseguire un controllo accettabile del movimento dell'antenna;
- Definire le traiettorie e le leggi di moto del gruppo antenna;

- Dimensionare il rocchetto e valutarne l'influenza della variazione di diametro durante l'avvolgimento/svolgimento;
- Scegliere tipologia e taglia dei motori/motoriduttori;
- Realizzare il controllo dei motori;
- Capire come riuscire a trasportare in sicurezza il cavo dell'antenna;
- Scegliere i cavi che movimentano il gruppo antenna;

Una volta superate tutte queste questioni sarà allora possibile cimentarsi nella realizzazione di un primo prototipo fisico e testarne le prestazioni reali confrontandole con quelle teoriche.

CAPITOLO 4

ROBOT PARALLELI CAVO-GUIDATI

Nel capitolo precedente si è discussa la scelta di un meccanismo robot cavo-guidato per la movimentazione della scheda di lettura RFID. Verrà ora presentata in linea generale questa tipologia di robot, trattando in particolar modo la sottofamiglia dei robot paralleli planari. Quest'ultima tipologia infatti è quella che meglio si adatta all'applicazione in esame in quanto si lavorerà all'interno di un intercapedine che si estende su un piano verticale.

4.1 Introduzione ai Robot Paralleli a Cavi

I robot a cavi sono una tipologia di robot paralleli, concepita alla fine degli anni '80, che presenta dei cavi in sostituzione alle gambe (link) rigide. Ciascuno degli n cavi viene avvolto e svolto da un motore che ne regola la lunghezza. Questa struttura conferisce al robot diversi vantaggi:

- Grande estensione dell'area di lavoro: è possibile coprire uno spazio di lavoro molto grande semplicemente facendo uso di cavi più lunghi.
- Elevato carico pagante (utile): grazie alla ridotta massa, e quindi inerzia, dei cavi, la quota-parte di carico spesa per movimentare la struttura del robot è molto ridotta.
- Notevoli capacità dinamiche: le inerzie contenute della struttura permettono movimenti molto rapidi.

- Bassi costi di produzione e di mantenimento.
- Trasportabilità: il peso contenuto e la semplicità costruttiva conferiscono facilità di trasporto e rapidità d'installazione.
- Design semplificato: grazie all'utilizzo di cavi leggeri con inerzia trascurabile, la dinamica, la modellazione ed il controllo del sistema risultano più semplici; ciò si traduce in contenuti costi di progettazione e facilità di riconfigurazione.

Affianco ai vantaggi appena elencati, coesiste una limitazione che è caratteristica di questi robot: i cavi possono lavorare solo se mantenuti in tensione (tensione positiva) in quanto non possono esercitare una spinta sull'*end-effector* (elemento terminale). Questa peculiarità comporta complessi problemi nel controllo del manipolatore e nella pianificazione delle traiettorie poiché le tipiche tecniche, utilizzate con i robot seriali e con i paralleli rigidi, non sono in questo caso applicabili e devono essere modificate per soddisfare il vincolo aggiuntivo di tensioni sempre positive. La diretta implicazione di ciò è che un sistema ad n gradi di libertà richiede almeno $n+1$ cavi per essere completamente controllato. In realtà può esserci anche la possibilità che per un robot, con n gradi di libertà e n cavi, esista un range di carichi esterni entro il quale il sistema è pienamente controllato. Un manipolatore che non è in grado di mantenere la posizione di equilibrio a fronte di un qualsiasi sistema di forze e momenti esterni si definisce *sotto-vincolato*. Inoltre un robot ad m cavi è detto *ridondante* quando $m > n+1$ (o $m > n$ entro un opportuno range di carichi esterni). Un robot a cavi può essere allo stesso tempo ridondante e sottovincolato.

Generalmente la posizione dell'elemento terminale non è direttamente misurabile e da ciò consegue un'intrinseca imprecisione del meccanismo. Infatti, a valle della rotazione controllata del motore, allungamenti/rilassamenti dovuti all'elasticità dei cavi, variazione del diametro della bobina e problemi di calibratura provocano incertezza sul posizionamento dell'end effector.

Un altro inconveniente, inerente ai meccanismi paralleli in generale, è rappresentato dal fatto che, a seconda delle configurazioni (numero e disposizione dei cavi), si hanno dei limiti sulle forze applicabili lungo alcune

direzioni e, all'aumentare del numero di cavi, vi è una riduzione del *workspace* (spazio di lavoro) dovuta a fenomeni di interferenza fra i cavi stessi.

Alcuni esempi di robot cavo-guidati ad oggi esistenti sono: *NIST RoboCrane*, *McDonnell-Douglas Charlotte* e *Skycam*. Il *RoboCrane* (Figura 4.1) è un manipolatore sviluppato per la movimentazione di carichi pesanti. *RoboCrane* impiega sei cavi che supportano una piattaforma mobile e sfrutta la gravità per mantenere i cavi sempre in tensione. Lo *Charlotte* è stato invece progettato per l'utilizzo sulla Stazione Spaziale Internazionale: un box rettangolare viene guidato da otto cavi controllati da altrettanti motori posizionati a bordo. La *Skycam* (Figura 4.2) infine è una telecamera aerea controllata da remoto utilizzata per la ripresa di eventi sportivi.

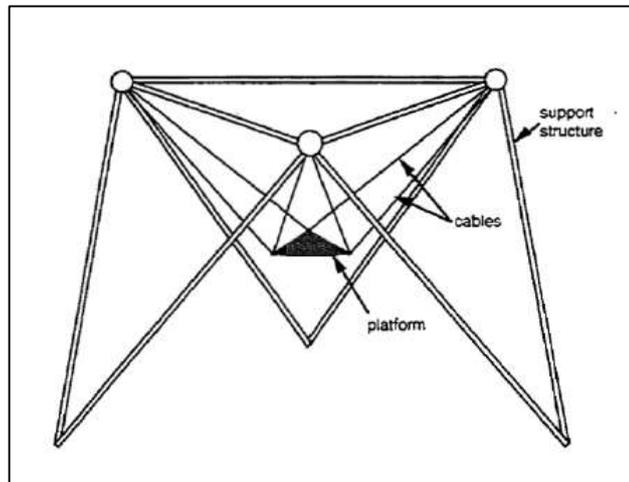


Figura 4.1: Schema della struttura del RoboCrane

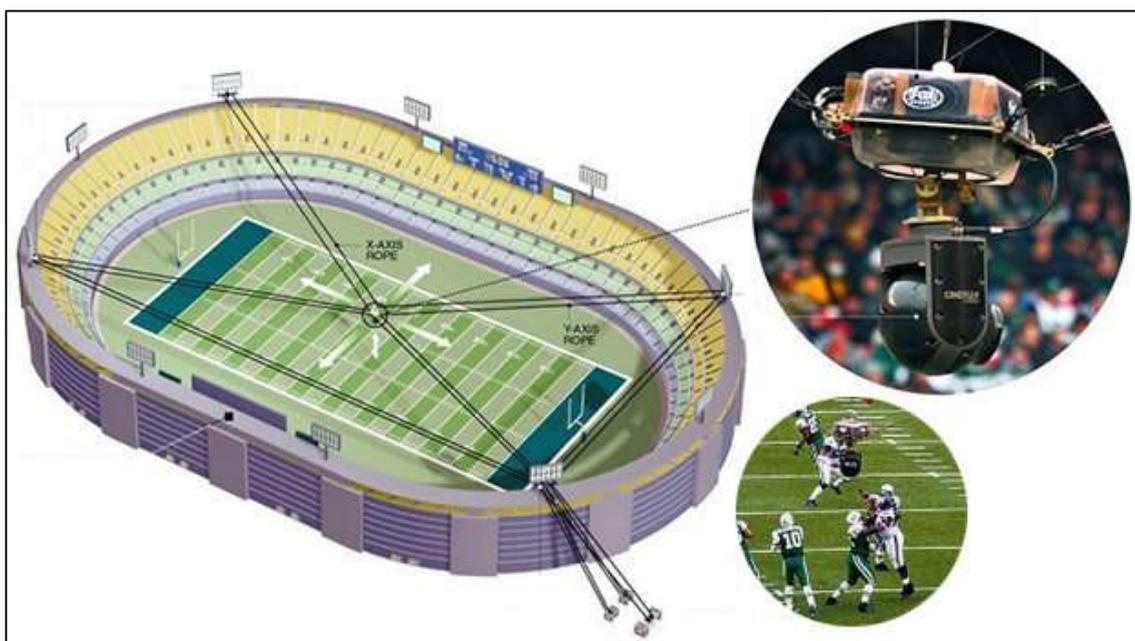


Figura 4.2: Skycam

L'assenza di link rigidi rende i robot a cavi adatti all'interazione con l'uomo e quindi utilizzabili come macchine per la riabilitazione ed interfacce aptiche. Altre applicazioni si riscontrano in ambito di assemblaggio industriale, simulatori, movimentazione di materiale potenzialmente pericoloso, orientazione di telescopi sferici ad ampio raggio, chirurgia, pittura edile.

4.2 Robot parallelo cavo-guidato operante su un piano

Quando si limita lo spazio di lavoro ad un piano specifico, i gradi di libertà dell'end-effector si riducono a tre a condizione che lo spostamento in direzione ortogonale al piano di lavoro sia opportunamente vincolato, altrimenti insorgono oscillazioni lungo questa direzione. Gli spostamenti possibili corrispondono a due traslazioni lungo le direzioni cartesiane che definiscono il piano ed una rotazione sul piano medesimo.

Sul piano di lavoro si trovano l'end-effector e i cavi che lo trascinano. Ciascun cavo passa attraverso un punto fiso A_i , in corrispondenza del punto di stacco dal rocchetto oppure in corrispondenza di un passa-cavo, e ha l'estremità nel punto di attacco all'elemento terminale B_i . La lunghezza L_i dell' i -esimo cavo sul piano di lavoro corrisponde alla distanza $\overline{B_i - A_i}$. Se non interessa controllare l'orientazione dell'elemento terminale si può far convergere tutti i cavi in un unico punto, per esempio sul centro di massa dell'end-effector, in modo da gestire solamente gli altri due rimanenti gradi di libertà e semplificare lo studio cinematico.

Nel caso di area piana rettangolare, come nell'applicazione studiata, servono quattro cavi, con i punti A_i posizionati ai quattro vertici, per meglio coprire l'intero spazio disponibile. Lavorando però su un piano verticale e considerando quindi l'influenza della gravità, si può anche optare per una soluzione sotto-vincolata poiché sono sufficienti due soli cavi, passanti per i due vertici superiori. In questa seconda configurazione il numero dei gradi di libertà è superiore al numero dei cavi ed è quindi, in questo caso, più conveniente farli convergere in un unico punto.

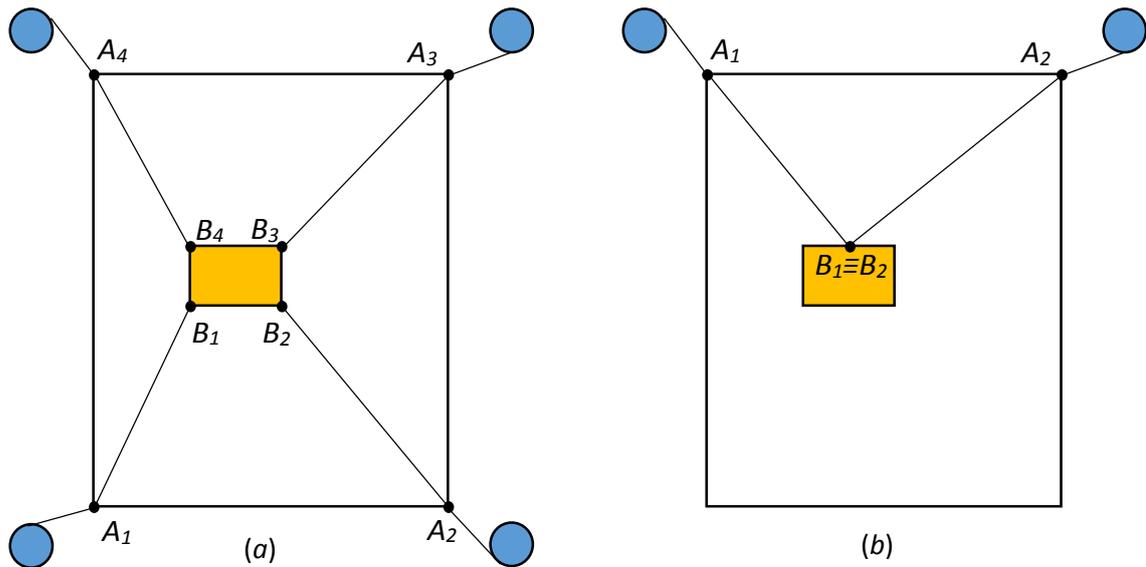


Figura 4.3: Configurazioni a (a) 4 e a (b) 2 cavi

In entrambe le configurazioni, a causa della forza peso agente verso il basso, più l'elemento terminale si avvicina alla parte alta dell'area rettangolare e più significative divengono le tensioni nei cavi superiori fino a raggiungere un valore infinito qualora ci si allineasse al lato estremo compreso fra i due passa-cavi. Per questo motivo i punti che si trovano nella zona più alta sono difficilmente raggiungibili. Con un semplice calcolo statico, applicato alla configurazione *b*, si può osservare quanto detto; ipotizzando di trovarsi sulla mezzeria le lunghezze dei due cavi sono le medesime, così come le loro tensioni (T) e la loro inclinazione (ϑ) rispetto alla direzione orizzontale:

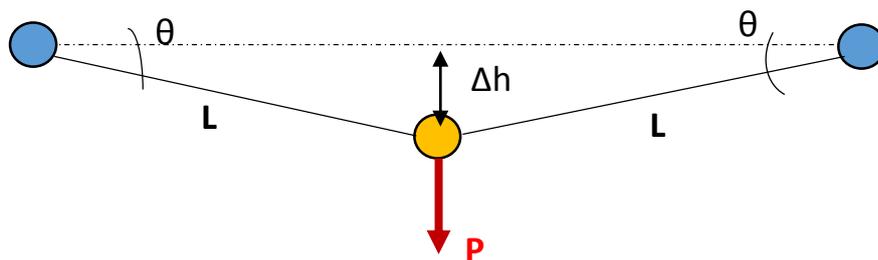


Figura 4.4: Schema semplificato per il calcolo delle tensioni massime nei cavi

Si può studiare un solo cavo scomponendo la tensione T nelle sue due componenti cartesiane T_x e T_y :

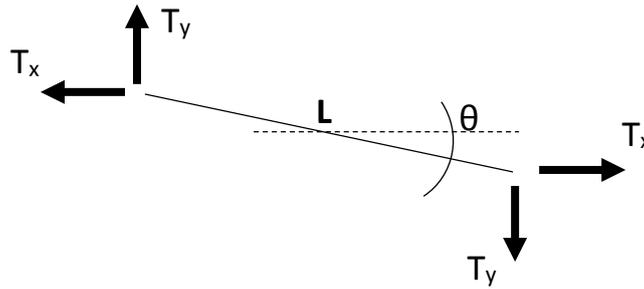


Figura 4.5: Scomposizione della tensione in un cavo

$$T_y = T \sin \theta$$

Sulla mezzeria $T_y = P/2$, ne consegue:

$$T = \frac{P}{2 \sin \theta}$$

Quando θ vale zero la tensione nel cavo T va all'infinito, per qualsiasi valore di $P \neq 0$. Questo fenomeno si riscontra anche quando, nella configurazione a , ci si avvicina agli altri lati dell'area rettangolare e le tensioni nei cavi opposti sono non nulle. È facile quindi rendersi conto che l'area disponibile non sarà mai completamente coperta e la taglia dei motori che si andranno a dimensionare dipenderà sostanzialmente dall'entità delle tensioni massime che si instaureranno nei cavi.

Nei capitoli che seguono si studieranno entrambe le configurazioni sopra descritte applicando un'analisi cinematica e dinamica; saranno poi valutate dal punto di vista di prestazioni e costi e si perverrà ad una scelta finale con la quale verrà progettato il prototipo.

4.3 Studio generale di un robot a cavi

Studiare un robot a cavi significa innanzitutto stabilire la relazione tra il movimento dell'elemento terminale e l'azione degli attuatori che ne governano il moto. Posizioni, velocità ed accelerazioni dell'end effector devono quindi essere legate ad angoli, velocità ed accelerazioni di rotazione dei motori. Questa analisi cinematica può essere condotta in due modi:

- *Cinematica diretta*: si ricavano le grandezze cinematiche dell'elemento terminale in funzione di quelle a monte dei motori.
- *Cinematica inversa*: le grandezze cinematiche dei motori vengono espresse in funzione di quelle dell'elemento terminale.

La cinematica inversa è richiesta per il controllo, ovvero una volta stabilita una certa legge di moto da far eseguire all'end effector si definiscono gli input che devono essere comunicati agli attuatori. Se invece si vuole simulare il comportamento del sistema si ricorre alla cinematica diretta.

Si osservi che, ipotizzando in ogni istante tensioni dei cavi positive o nulle, l'analisi cinematica inversa è sempre applicabile e risolvibile, mentre quando il robot è sottovincolato non è possibile percorrere la via diretta. In questo caso infatti, date le lunghezze di ciascun cavo, esistono infinite posizioni dell'elemento terminale. Si deve quindi risolvere il problema diretto sottovincolato cercando, fra le infinite soluzioni, quelle posizioni per le quali vale un equilibrio statico.

Prima di iniziare un'analisi cinematica è importante definire uno schema geometrico della macchina (*Figura 4.6*) avente N cavi ed N motori. Si stabilisce un sistema di riferimento assoluto $Oxyz$, con versori $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, e un sistema di riferimento relativo $O'x'y'z'$, con versori $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$, solidale all'elemento terminale con origine in corrispondenza del centro di massa G . Infine si individuano,

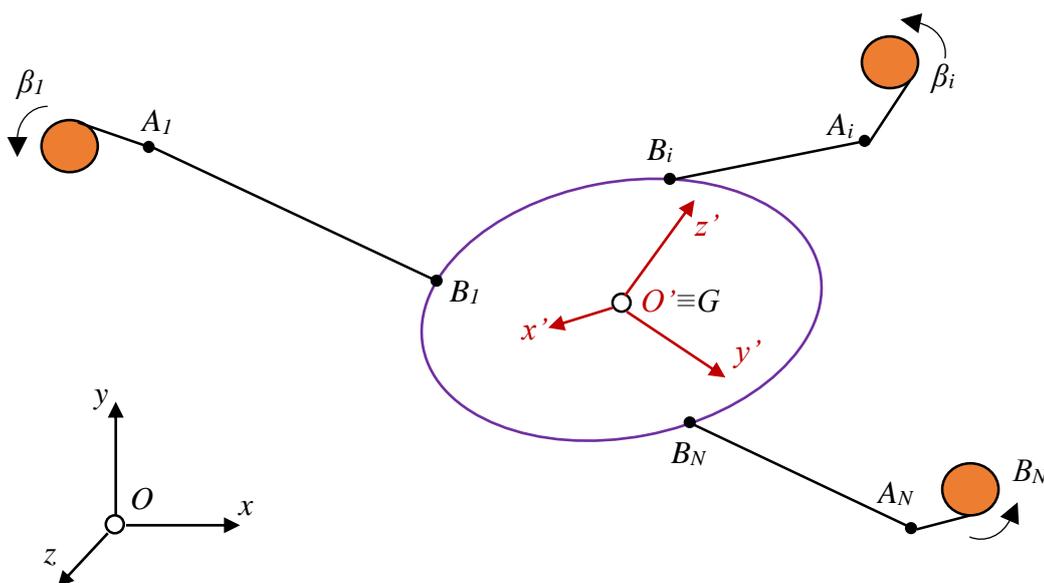


Figura 4.6: Schema Geometrico di un generico Robot a Cavi

rispetto ai sistemi di riferimento appena descritti, i punti B_i di aggancio dei cavi all'end-effector e i punti A_i fissi a telaio (es. passa-cavi) per i quali passano i cavi medesimi.

Siano (X, Y, Z) le coordinate del centro di massa G nel sistema di riferimento assoluto, siano poi γ, φ, η gli angoli di rotazione dell'end-effector attorno agli assi del sistema $Oxyz$ e sia L_i la lunghezza dell' i -esimo cavo all'istante generico t . L_i non è la reale lunghezza del cavo, ma ne rappresenta solo il tratto, interno allo spazio di lavoro, misurato come distanza tra A_i e B_i : $L_i = d(A_i, B_i)$. Si assume infine la convenzione che i rocchetti, e quindi i motori, abbiano rotazione positiva β_i quando avvolgono il cavo.

4.3.1 Cinematica diretta

È conveniente, ragionando sul caso generale tridimensionale, avvalersi di una rappresentazione vettoriale:

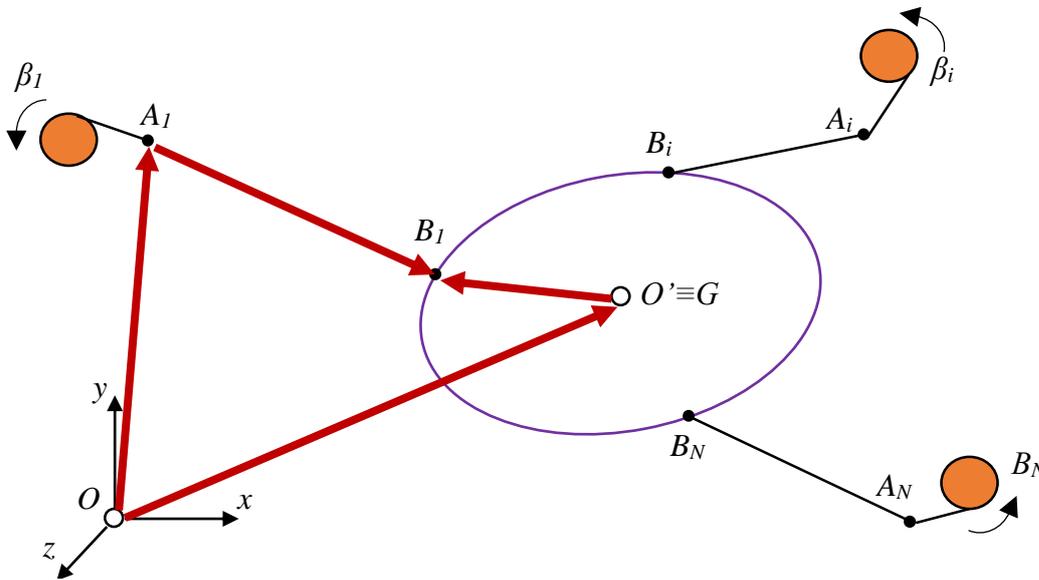


Figura 4.7: Rappresentazione Vettoriale

Vale la seguente uguaglianza:

$$\overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{A_iB_i} = \overrightarrow{OG} + \overrightarrow{GB_i} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.1)$$

Osservazioni:

- $\overrightarrow{OG} = \mathbf{X} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$ è il vettore che indica la posizione assoluta (incognita) del centro di massa;
- \overrightarrow{GB}_i equivale al vettore \mathbf{x}'_{B_i} (noto) riportato nel sistema di riferimento assoluto mediante una trasformazione $\mathbf{R}(\gamma, \varphi, \eta)$ che tiene conto delle rotazioni di $Ox'y'z'$ rispetto a $Oxyz$;
- $\overrightarrow{OA}_i = \mathbf{x}_{A_i}$ rimane sempre fisso e noto.

Conoscendo le rotazioni β_i dei rocchetti, è immediato ricavare la lunghezza L_i di ciascun cavo esprimendola come differenza tra la lunghezza L_{0i} all'istante iniziale $t_0 = 0$ e la quantità avvolta fino all'istante t :

$$L_i = L_{0i} - r_i \beta_i \quad i = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

dove r_i è il raggio dell' i -esimo rocchetto e L_{0i} vale:

$$L_{0i} = \sqrt{[(x_{B_{0i}} - x_{A_i})^2 + (y_{B_{0i}} - y_{A_i})^2 + (z_{B_{0i}} - z_{A_i})^2]} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.3)$$

Isolando il vettore $\overrightarrow{A_i B_i}$ in (4.1) ed elevando tutto al quadrato si ottiene:

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{A_i B_i})^2 &= [(\overrightarrow{OG} + \overrightarrow{GB}_i - \overrightarrow{OA}_i)]^2 \quad i = 1, \dots, N \\ \|\overrightarrow{A_i B_i}\|^2 &= \|\overrightarrow{OG} + \overrightarrow{GB}_i - \overrightarrow{OA}_i\|^2 \quad i = 1, \dots, N \\ L_i^2 &= \|\overrightarrow{OG} + \overrightarrow{GB}_i - \overrightarrow{OA}_i\|^2 \quad i = 1, \dots, N \\ [L_i(\beta_i)]^2 &= \|\mathbf{X} + \mathbf{x}'_{B_i} \mathbf{R}(\gamma, \varphi, \eta) - \mathbf{x}_{A_i}\|^2 \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4.4)$$

Mettendo a sistema n equazioni come (4.4), con n pari al numero di gradi di libertà, è a questo punto possibile esprimere la posizione assoluta dell'elemento terminale in funzione delle rotazioni β_i .

Derivando rispetto al tempo la legge cinematica diretta di posizione si risolve il problema cinematico diretto di velocità. Derivando ulteriormente si perviene alla legge cinematica diretta di accelerazione.

4.3.2 Cinematica inversa

Riprendendo quanto detto precedentemente, la lunghezza L_i dell' i -esimo cavo è misurabile come la distanza tra i due punti A_i e B_i e vale:

$$L_i = \sqrt{[(x_{B_i} - x_{A_i})^2 + (y_{B_i} - y_{A_i})^2 + (z_{B_i} - z_{A_i})^2]} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

Le coordinate del punto B_i , raccolte nel vettore \mathbf{x}_{B_i} , si possono scrivere in funzione delle coordinate assolute del centro di massa (vettore \mathbf{X}):

$$\mathbf{x}_{B_i} = \mathbf{X} + \mathbf{x}'_{B_i} \mathbf{R}(\gamma, \varphi, \eta) \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

Riprendendo la relazione (4.2):

$$L_i = L_{0i} - r_i \beta_i$$

Si può ora esprimere la rotazione dell' i -esimo rocchetto β_i in funzione della posizione dell'elemento terminale:

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_i \\ \vdots \\ \beta_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{r_1} [L_{01} - L_1(\mathbf{X}, \gamma, \varphi, \eta)] \\ \vdots \\ \frac{1}{r_i} [L_{0i} - L_i(\mathbf{X}, \gamma, \varphi, \eta)] \\ \vdots \\ \frac{1}{r_N} [L_{0N} - L_N(\mathbf{X}, \gamma, \varphi, \eta)] \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Derivando rispetto al tempo due volte si ottengono le leggi cinematiche inverse di velocità ed accelerazione.

4.3.3 Analisi Dinamica

Un modello dinamico del sistema è indispensabile per quantificare le tensioni indotte nei cavi durante il movimento e quindi valutare le coppie richieste ai motori. Inoltre, uno studio dinamico è richiesto per tener conto dell'influenza delle inerzie durante l'inseguimento della traiettoria.

Per semplificare la trattazione si assume che i cavi siano privi di massa e inestensibili e si trascura l'attrito coulombiano.

Il sistema viene studiato separando il modello dell'elemento terminale dal modello degli N attuatori.

Si considera dapprima l'end-effector:

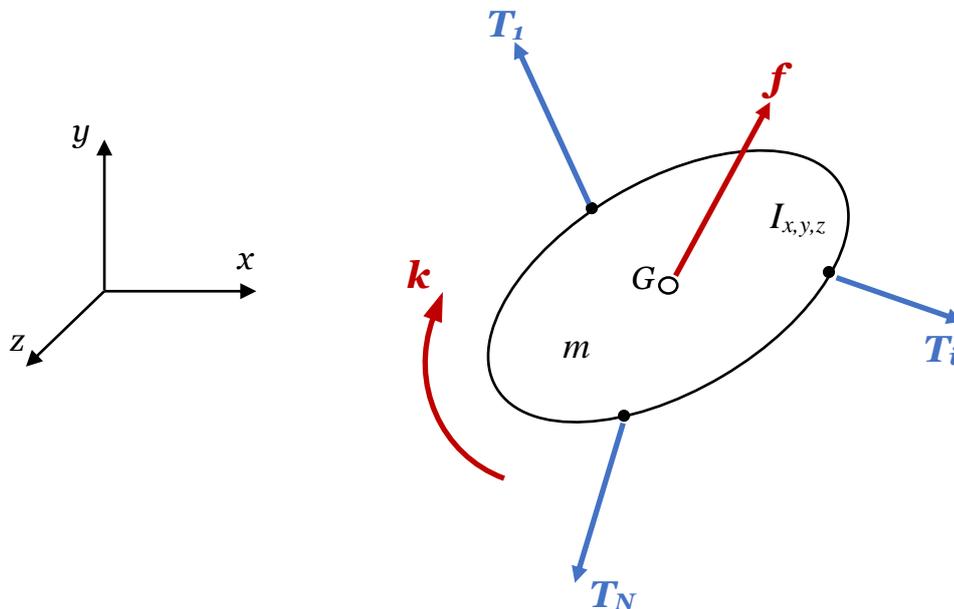


Figura 4.8: Diagramma di corpo libero dell'end-effector

In *figura 4.8* è rappresentato il diagramma di corpo libero dell'elemento terminale nel quale \mathbf{f} e \mathbf{k} sono rispettivamente i vettori delle forze e delle coppie esterne applicate. Si definisce il vettore \mathbf{T} contenente le N tensioni T_i , positive o nulle, esercitate dai cavi sull'end-effector. L'equilibrio è dato da:

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ k_\gamma \\ k_\varphi \\ k_\eta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{Tx} \\ F_{Ty} \\ F_{Tz} \\ K_{T\gamma} \\ K_{T\varphi} \\ K_{T\eta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\eta} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_T = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} \quad (4.8)$$

dove \mathbf{F}_{ext} è un vettore che raccoglie le componenti di forze e momenti esterni, \mathbf{F}_T contiene le componenti di forze e momenti risultanti dalle tensioni esercitate dagli N cavi, \mathbf{M} è una matrice diagonale contenente la massa e i momenti d'inerzia rispetto ai tre assi cartesiani, infine $\ddot{\mathbf{X}}$ è il vettore delle accelerazioni dei sei generici gradi di libertà.

Il vettore \mathbf{F}_T si ottiene dal vettore \mathbf{T} per mezzo di una matrice \mathbf{S} :

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{S}\mathbf{T} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \cdots & \mathbf{u}_N \\ \mathbf{p}_1 \times \mathbf{u}_1 & \mathbf{p}_2 \times \mathbf{u}_2 & \cdots & \mathbf{p}_N \times \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

\mathbf{u}_i è il versore che definisce la direzione dell' i -esimo cavo con verso che si allontana dall'elemento; \mathbf{p}_i è il vettore che collega il centro di massa G al punto dove si aggancia l' i -esimo cavo.

Si procede studiando l'equilibrio dei rocchetti:

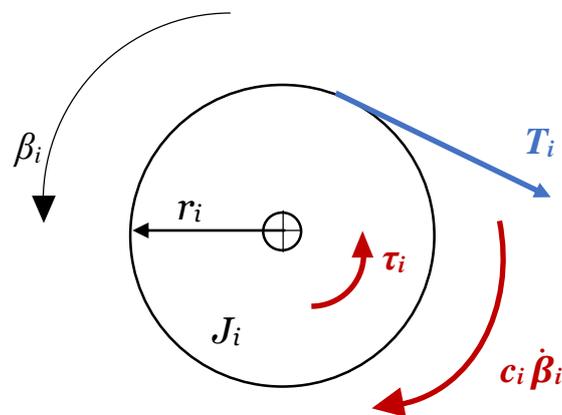


Figura 4.9: Diagramma di corpo libero di un rocchetto

Sia, per l' i -esimo rocchetto, τ_i la coppia motrice proveniente dal motore, J_i l'intera inerzia rotante dell'asse motore-riduttore-rocchetto, c_i un coefficiente di smorzamento viscoso e r_i il raggio. L'equazione dell'equilibrio dinamico, in forma matriciale, è la seguente:

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_N \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & c_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\beta}_N \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & r_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & J_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\beta}_N \end{Bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{r}\mathbf{T} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}} \quad (4.11)$$

Infine si combinano le equazioni (4.8), (4.9) e (4.11):

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_T &= \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} \\ \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{S}\mathbf{T} &= \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} \\ \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{S}\mathbf{r}^{-1}[\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}}] &= \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} \\ \mathbf{r}\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{S}\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{S}\mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} &= \mathbf{S}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{r}\mathbf{F}_{ext} \end{aligned} \quad (4.12)$$

L'equazione così ottenuta rappresenta il modello dinamico del sistema e da essa è possibile isolare il termine con le coppie richieste ai motori:

$$\mathbf{S}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r}\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{S}\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{S}\mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{r}\mathbf{F}_{ext} \quad (4.13)$$

Per calcolare $\boldsymbol{\tau}$ occorre invertire la matrice \mathbf{S} ma questa è in generale non quadrata e quindi non invertibile. \mathbf{S} è quadrata quando il numero dei cavi è pari al numero di gradi di libertà del sistema, $N = n$, e il problema è quindi di facile risoluzione; altrimenti, se $N > n$ si hanno infinite soluzioni possibili per $\boldsymbol{\tau}$ e si può sceglierne una che minimizzi una funzione obiettivo risolvendo un problema di programmazione lineare. Quando invece $N < n$ il sistema di equazioni è impossibile e si deve ricercare una soluzione approssimata; si può fare ciò

ricorrendo alla matrice pseudoinversa la quale ricerca una soluzione che soddisfi il criterio dei minimi quadrati:

$$\mathbf{S}^{\#} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T$$
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{S}^{\#} (\mathbf{r} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{S} \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{S} \mathbf{C} \boldsymbol{\beta} - \mathbf{r} \mathbf{F}_{ext})$$

CAPITOLO 5

ROBOT PLANARE A QUATTRO CAVI

Si prende ora in esame un robot parallelo di tipo planare nella configurazione verticale con elemento terminale guidato da $N = 4$ cavi passanti per i quattro vertici di un'area di lavoro rettangolare. Si considera il caso di cavi non convergenti in un unico punto ma fissati ai vertici di un end-effector che a questo livello dello studio viene ipotizzato di forma rettangolare. Presupponendo che il moto dell'elemento terminale sia opportunamente vincolato a mantenersi sempre all'interno del piano di lavoro, il robot in esame presenta $n = 3$ gradi di libertà: traslazione orizzontale (asse x), traslazione verticale (asse y) e rotazione sul piano (coordinata angolare γ). In *fig. 5.1* è illustrato lo schema del robot.

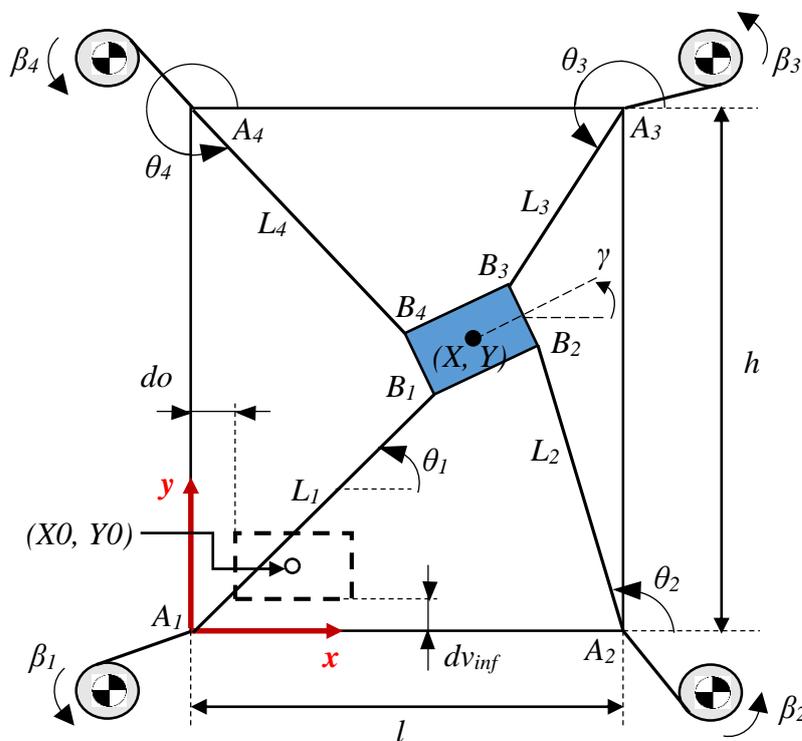


Figura 5.1: Schema Robot a 4 Cavi

5.1 Pianificazione della Traiettoria

L'operazione che deve svolgere il robot è spostare sul piano di lavoro un'antenna RFID in modo da farle coprire la maggior area possibile. Il modo più semplice di fare ciò è descrivere una traiettoria a serpentina, partendo ad esempio dal basso e procedendo verso l'alto, con passo tra una passata e l'altra circa uguale al diametro del cono di lettura dell'antenna. Si costruisce così un percorso costituito da una serie di tratti rettilinei orizzontali e verticali che si alternano (*fig. 5.2*), mantenendo rotazione γ nulla.

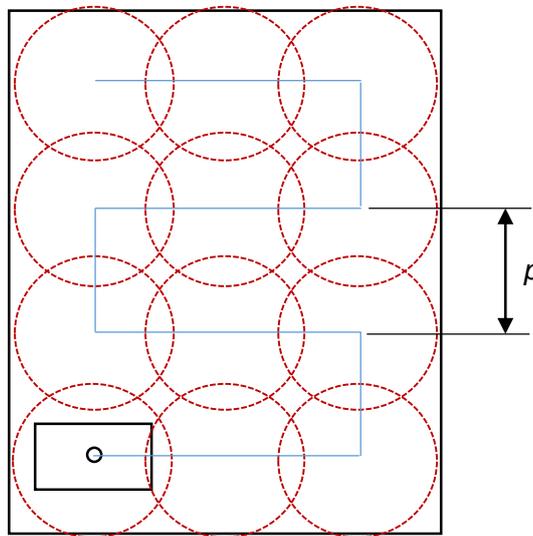


Figura 5.2: Traiettoria

Per ciascun tratto rettilineo si sceglie di adottare una legge di moto di tipo polinomiale di quinto grado affinché si abbiano profili continui di posizione, velocità ed accelerazione. La legge polinomiale di quinto grado nella coordinata curvilinea s è la seguente:

$$s(t) = s_0 + s_1 t + s_2 t^2 + s_3 t^3 + s_4 t^4 + s_5 t^5 \quad (5.1)$$

Siano S_f e T_f rispettivamente la lunghezza totale di un tratto rettilineo ed il relativo tempo di percorrenza. Imponendo $s(0) = 0$, $s(T_f) = S_f$ ed imponendo anche l'annullarsi delle derivate prima e seconda agli estremi del percorso ($\dot{s}(0) = \dot{s}(T_f) = \ddot{s}(0) = \ddot{s}(T_f) = 0$), si ricavano i coefficienti del polinomio:

$$s_0 = s_1 = s_2 = 0;$$

$$s_3 = 10 \frac{S_f}{T_f^3};$$

$$s_4 = -15 \frac{S_f}{T_f^4};$$

$$s_5 = 6 \frac{S_f}{T_f^5}.$$

$$s(t) = 10 \frac{S_f}{T_f^3} t^3 - 15 \frac{S_f}{T_f^4} t^4 + 6 \frac{S_f}{T_f^5} t^5 \quad (5.2)$$

Derivando due volte rispetto al tempo si ottengono anche i profili di velocità ed accelerazione:

$$\dot{s}(t) = 30 \frac{S_f}{T_f^3} t^2 - 60 \frac{S_f}{T_f^4} t^3 + 30 \frac{S_f}{T_f^5} t^4 \quad (5.3)$$

$$\ddot{s}(t) = 60 \frac{S_f}{T_f^3} t - 180 \frac{S_f}{T_f^4} t^2 + 120 \frac{S_f}{T_f^5} t^3 \quad (5.4)$$

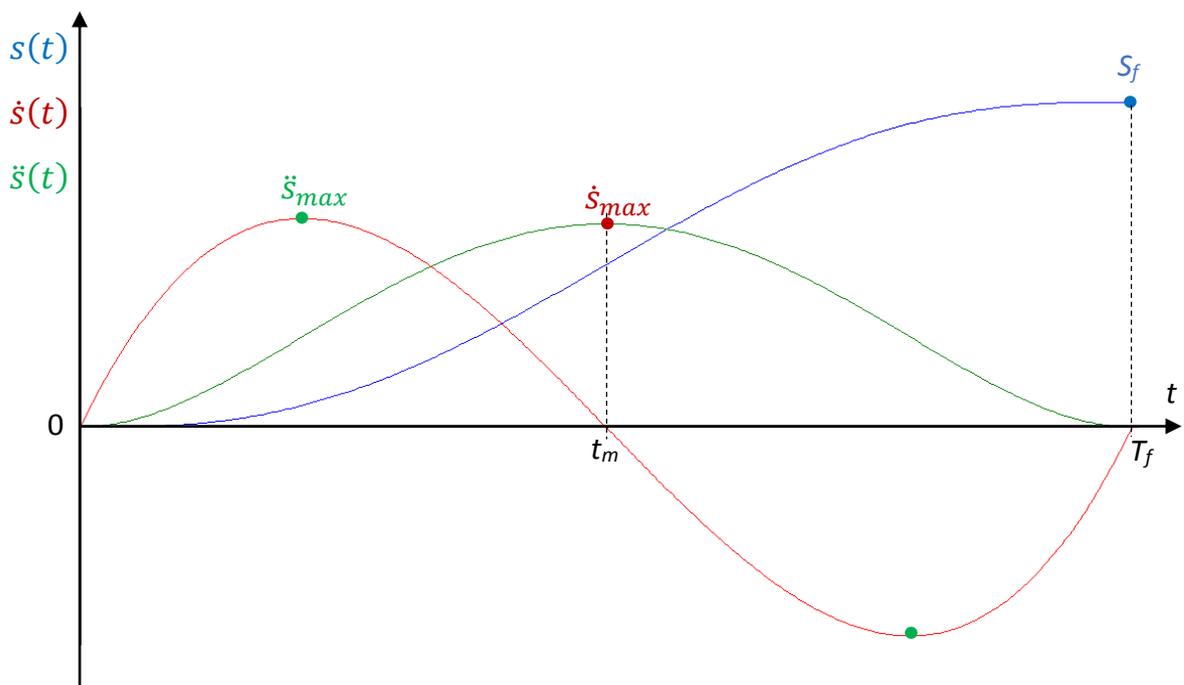


Figura 5.3: Legge di moto polinomiale - grado 5

Come si può vedere dalla *fig. 5.3*, il profilo di velocità è simmetrico rispetto all'istante $t_m = T_f/2$, in corrispondenza del quale si ha la velocità massima $\dot{s}_{max} = 15S_f/(8T_f)$ e l'accelerazione vale zero. Il profilo di accelerazione invece è antisimmetrico rispetto all'istante t_m ed è sempre positivo nella prima metà e sempre negativo nella seconda con accelerazione massima pari a $\ddot{s}_{max} = 10S_f/(T_f^2\sqrt{3})$.

5.2 Analisi Cinematica Inversa

Una volta stabilito il percorso da seguire, si applica la cinematica inversa per trovare le rotazioni dei rocchetti.

5.2.1 Cinematica inversa di posizione

La lunghezza dell' i -esimo cavo si calcola utilizzando la (4.5):

$$L_i = \sqrt{(x_{B_i} - x_{A_i})^2 + (y_{B_i} - y_{A_i})^2} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (5.5)$$

Le coordinate dei punti A_i sono fisse:

$$A_1(0,0); A_2(l,0); A_3(l,h); A_4(0,h)$$

Le coordinate dei punti B_i si possono esprimere in funzione di quelle del centro di massa $G(X,Y)$ e della coordinata γ :

$$\begin{cases} x_{B_i} = X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_i) \\ y_{B_i} = Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_i) \end{cases} \quad i = 1, \dots, 4$$

dove $d = \sqrt{h_a^2 + l_a^2}/2$, $\delta_1 = \tan^{-1}(h_a/l_a)$, $\delta_2 = \pi - \delta_1$, $\delta_3 = \pi + \delta_1$ e $\delta_4 = 2\pi - \delta_1$.

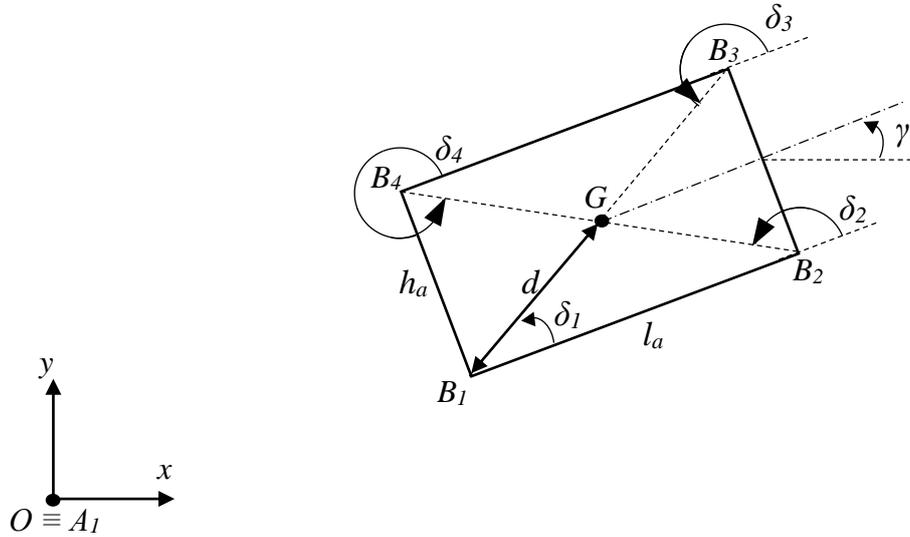


Figura 5.4: Schema dell'elemento terminale

Sostituendo nella (5.5) si ottiene:

$$L_i = \sqrt{(X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_i) - x_{A_i})^2 + (Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_i) - y_{A_i})^2} \quad (5.6)$$

$i = 1, \dots, 4$

Le lunghezze dei cavi all'istante iniziale (L_{0i}) valgono:

$$L_{0i} = \sqrt{(x_{B_{0i}} - x_{A_i})^2 + (y_{B_{0i}} - y_{A_i})^2} \quad (5.7)$$

All'istante $t = 0$ le coordinate dei punti B_{0i} sono:

$$\begin{aligned} x_{B_{01}} &= d_0; & y_{B_{01}} &= d v_{inf} \\ x_{B_{02}} &= d_0 + l_a; & y_{B_{02}} &= d v_{inf} \\ x_{B_{03}} &= d_0 + l_a; & y_{B_{03}} &= d v_{inf} + h_a \\ x_{B_{04}} &= d_0; & y_{B_{04}} &= d v_{inf} + h_a \end{aligned}$$

Perciò si ha:

$$\begin{aligned}
 L_{01} &= \sqrt{(do)^2 + (dv_{inf})^2} \\
 L_{02} &= \sqrt{(do + la - l)^2 + (dv_{inf})^2} \\
 L_{03} &= \sqrt{(do + la - l)^2 + (dv_{inf} + ha - h)^2} \\
 L_{04} &= \sqrt{(do)^2 + (dv_{inf} + ha - h)^2}
 \end{aligned}$$

Si applica poi la (4.2) e, impiegando rocchetti tutti con le stesse dimensioni ($r_i = r, i = 1, \dots, 4$), si perviene alla legge cinematica inversa di posizione:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\beta} &= \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{Bmatrix} \\
 &= \frac{1}{r} \begin{Bmatrix} L_{01} - \sqrt{(X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_1))^2 + (Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_1))^2} \\ L_{02} - \sqrt{(X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_2) - l)^2 + (Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_2))^2} \\ L_{03} - \sqrt{(X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_3) - l)^2 + (Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_3) - h)^2} \\ L_{04} - \sqrt{(X - d \cdot \cos(\gamma + \delta_4))^2 + (Y - d \cdot \sin(\gamma + \delta_4) - h)^2} \end{Bmatrix} \quad (5.8)
 \end{aligned}$$

5.2.2 Cinematica inversa di velocità

La derivata rispetto al tempo di (5.8) fornisce la soluzione al problema cinematico inverso di velocità:

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} & \frac{\partial \beta_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} & \frac{\partial \beta_2}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_3}{\partial x} & \frac{\partial \beta_3}{\partial y} & \frac{\partial \beta_3}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_4}{\partial x} & \frac{\partial \beta_4}{\partial y} & \frac{\partial \beta_4}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\gamma} \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

Calcolo delle derivate parziali:

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial x} = -\frac{x_{B_i} - x_{A_i}}{rL_i} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial y} = -\frac{y_{B_i} - y_{A_i}}{rL_i} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \gamma} = -\frac{d[x_{B_i} \sin(\gamma + \delta_i) - y_{B_i} \cos(\gamma + \delta_i)]}{rL_i} \quad (5.12)$$

Risulta quindi:

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{x_{B_1} - x_{A_1}}{L_1} & \frac{y_{B_1} - y_{A_1}}{L_1} & \frac{d[x_{B_1} \sin(\gamma + \delta_1) - y_{B_1} \cos(\gamma + \delta_1)]}{L_1} \\ \frac{x_{B_2} - x_{A_2}}{L_2} & \frac{y_{B_2} - y_{A_2}}{L_2} & \frac{d[x_{B_2} \sin(\gamma + \delta_2) - y_{B_2} \cos(\gamma + \delta_2)]}{L_2} \\ \frac{x_{B_3} - x_{A_3}}{L_3} & \frac{y_{B_3} - y_{A_3}}{L_3} & \frac{d[x_{B_3} \sin(\gamma + \delta_3) - y_{B_3} \cos(\gamma + \delta_3)]}{L_3} \\ \frac{x_{B_4} - x_{A_4}}{L_4} & \frac{y_{B_4} - y_{A_4}}{L_4} & \frac{d[x_{B_4} \sin(\gamma + \delta_4) - y_{B_4} \cos(\gamma + \delta_4)]}{L_4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\gamma} \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

5.2.3 Cinematica inversa di accelerazione

Con un'ulteriore derivazione si risolve il problema cinematico inverso di accelerazione:

$$\ddot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \right) \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \ddot{\mathbf{X}}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial y} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial y} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial y} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_4}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_4}{\partial y} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_4}{\partial \gamma} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\gamma} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} & \frac{\partial \beta_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} & \frac{\partial \beta_2}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_3}{\partial x} & \frac{\partial \beta_3}{\partial y} & \frac{\partial \beta_3}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \beta_4}{\partial x} & \frac{\partial \beta_4}{\partial y} & \frac{\partial \beta_4}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\gamma} \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

Calcolo della derivata rispetto al tempo della derivata parziale in x :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial x} \right) = - \frac{L_i \dot{x}_{B_i} - (x_{B_i} - x_{A_i}) \dot{L}_i}{r L_i^2} \quad (5.15)$$

dove:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{B_i} &= \dot{X} + d \sin(\gamma + \delta_i) \dot{\gamma} \\ \dot{L}_i &= \frac{(x_{B_i} - x_{A_i}) \dot{x}_{B_i} + (y_{B_i} - y_{A_i}) \dot{y}_{B_i}}{L_i} \end{aligned}$$

Calcolo della derivata rispetto al tempo della derivata parziale in y :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial y} \right) = - \frac{L_i \dot{y}_{B_i} - (y_{B_i} - y_{A_i}) \dot{L}_i}{r L_i^2} \quad (5.16)$$

dove:

$$\dot{y}_{B_i} = \dot{Y} - d \cos(\gamma + \delta_i) \dot{\gamma}$$

Calcolo della derivata rispetto al tempo della derivata parziale in γ :

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial \gamma} \right) \\ = & - \frac{d L_i \{ \dot{x}_{B_i} \sin(\gamma + \delta_i) - \dot{y}_{B_i} \cos(\gamma + \delta_i) + \dot{\gamma} [x_{B_i} \cos(\gamma + \delta_i) + y_{B_i} \sin(\gamma + \delta_i)] \}}{r L_i^2} \\ & - \frac{d \dot{L}_i [x_{B_i} \sin(\gamma + \delta_i) - y_{B_i} \cos(\gamma + \delta_i)]}{r L_i^2} \end{aligned} \quad (5.17)$$

La formulazione completa della legge cinematica inversa di accelerazione è data dalla somma di tutti i termini sopra esplicitati, ma per una questione di spazio non viene riportata nel seguito.

Si noti che, imponendo un movimento con angolo di rotazione $\gamma = \text{cost} = 0$, le leggi appena scritte si semplificano notevolmente in quanto tutti i termini legati alla rotazione γ si annullano.

5.3 Studio dinamico

Il modello dinamico descritto nel capitolo precedente ha portato alla definizione della relazione (4.13):

$$\mathbf{S}\boldsymbol{\tau} = r\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{S}\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{S}\mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} - r\mathbf{F}_{ext}$$

Nel caso particolare in esame, robot planare a quattro cavi con forza peso come unica forza esterna, si ha:

$$\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{Bmatrix} = r \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\gamma} \end{Bmatrix} + \mathbf{J}\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \\ \ddot{\beta}_3 \\ \ddot{\beta}_4 \end{Bmatrix} + c\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \\ \dot{\beta}_3 \\ \dot{\beta}_4 \end{Bmatrix} - r \begin{Bmatrix} 0 \\ -P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.18)$$

Si è assunto che tutti i sistemi di avvolgimento abbiano stessa inerzia J , stesso smorzamento c e stesso raggio rocchetto r . La matrice \mathbf{S} è quella che permette di esprimere le quattro tensioni dei cavi T_i ($i = 1, \dots, 4$) sotto forma di una risultante applicata al centro di massa G dell'elemento terminale, con componenti verticale ed orizzontale F_{Tx} e F_{Ty} , unita ad un momento K_T :

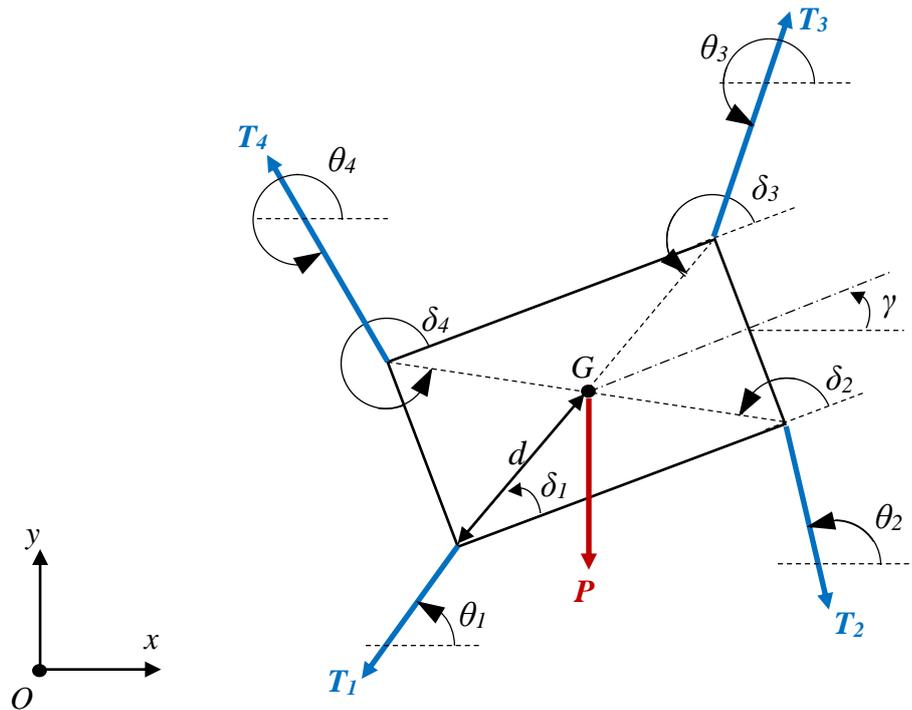


Figura 5.5: Diagramma di corpo libero dell'elemento terminale

$$\mathbf{F}_T = \begin{Bmatrix} F_{Tx} \\ F_{Ty} \\ K_T \end{Bmatrix} = \mathbf{S} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix}$$

Aiutandosi con la *fig. 5.5* si ricava:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 & -\cos \theta_3 & -\cos \theta_4 \\ -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & -\sin \theta_3 & -\sin \theta_4 \\ -d \sin(\xi_1) & -d \sin(\xi_2) & -d \sin(\xi_3) & -d \sin(\xi_4) \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

dove:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \gamma + \delta_i - \theta_i & i &= 1, \dots, 4 \\ \theta_i &= \operatorname{atan}_2 \frac{y_{B_i} - y_{A_i}}{x_{B_i} - x_{A_i}} & i &= 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Per calcolare le coppie motrici necessarie per ottenere la legge di moto desiderata bisognerebbe isolare il termine $\boldsymbol{\tau}$ nella (5.18) moltiplicando ambo i membri per la matrice inversa di \mathbf{S} . Come si vede dalla (5.19) \mathbf{S} è una matrice 3x4 non quadrata e pertanto non è invertibile e il problema presenta infinite soluzioni. Questo è facilmente intuibile se si pensa, per una generica configurazione statica del sistema, di precaricare i cavi; ipotizzando resistenza infinita, esistono infinite combinazioni di pretensionamento dei cavi che mantengono l'end-effector in quella posizione a condizione di avere sempre tensioni positive o nulle.

Come proposto in [4] è possibile risolvere un problema di programmazione lineare imponendo che tutte le tensioni siano positive e minimizzino una funzione obiettivo, ad esempio:

$$F.O. = \min \left(\sum_{i=1}^4 \tau_i \right) \quad (5.21)$$

Dalla relazione (5.18) si ricavano le seguenti equazioni di vincolo:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 -\tau_i \cos \theta_i = F_{eqx} \\ \sum_{i=1}^4 -\tau_i \sin \theta_i = F_{eqy} \\ \sum_{i=1}^4 -\tau_i d \cdot \sin \xi_i = K_{eq} \end{cases} \quad (5.23)$$

Imponendo infine che le tensioni dei cavi si mantengano sempre positive o, più in generale, maggiori di una T_{MIN} , si ottengono degli ulteriori vincoli descritti da disequazioni. Dalla (4.11) si isola \mathbf{T} e si impone $T_i \geq T_{MIN}$ con $i = 1, \dots, 4$:

$$\mathbf{T} = \mathbf{r}^{-1}[\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\beta}}] \geq \mathbf{T}_{MIN}$$

Infine si isola $\boldsymbol{\tau}$ e si ottiene il seguente sistema di disequazioni:

$$\begin{cases} \tau_1 \geq J\ddot{\beta}_1 + c\dot{\beta}_1 + rT_{MIN} = \tau_{1MIN} \\ \tau_2 \geq J\ddot{\beta}_2 + c\dot{\beta}_2 + rT_{MIN} = \tau_{2MIN} \\ \tau_3 \geq J\ddot{\beta}_3 + c\dot{\beta}_3 + rT_{MIN} = \tau_{3MIN} \\ \tau_4 \geq J\ddot{\beta}_4 + c\dot{\beta}_4 + rT_{MIN} = \tau_{4MIN} \end{cases} \quad (5.24)$$

Il problema di programmazione lineare appena descritto è facilmente risolvibile con un codice di calcolo. Per questa trattazione è stato sviluppato un algoritmo mediante codice *Matlab*.

5.4 Implementazione dell'analisi

Nei paragrafi precedenti è stato impostato lo studio, cinematico e dinamico, a partire dalla definizione di un percorso costituito da una successione di tratti rettilinei il cui numero e la cui estensione sono legati alle dimensioni dello specifico armadio sul quale viene montato il modulo.

Per poter dare una valutazione alla configurazione di robot in esame è necessario ipotizzare una geometria dell'armadio e delle tempistiche di movimento per poter calcolare le coppie richieste ai motori. A tal fine è stato scritto un algoritmo che, applicando l'analisi cinematica e dinamica, è in grado di calcolare le coppie in funzione dei parametri geometrici e temporali che possono essere di volta in volta cambiati per studiare diverse configurazioni.

Nella prima parte del programma si definiscono tutti i parametri geometrici: larghezza e altezza dell'armadio, dimensioni dell'antenna RFID e del suo cono di lettura, posizione di zero, posizione dei passa-cavi, distanziamenti dv_{inf} , dv_{sup} e do (vedi *fig. 5.6*) e raggio dei rocchetti. Da questi dati si ricavano le lunghezze ed il numero delle corse orizzontali (Sc_o) e verticali (Sc_v) necessarie per coprire l'intera area di lavoro e si definisce quindi la traiettoria da compiere. Il passo di scansione $p = Sc_v$ viene calcolato in modo da essere inferiore o uguale al diametro del cono di lettura e tale da scansionare l'area con un numero intero di corse orizzontali. Si impongono infine i tempi di percorrenza dei tratti di traiettoria ed i parametri dinamici: massa dell'end-effector, inerzia del gruppo motore-rocchetto e coefficiente di smorzamento viscoso.

La seconda parte del programma applica lo studio cinematico e dinamico in successione per ogni singolo tratto di percorso mediante una *function*. Gli step di calcolo sono:

1. Legge polinomiale di quinto grado per la posizione dell'elemento terminale e derivazione rispetto al tempo per ottenere le leggi di velocità ed accelerazione;
2. Lunghezza, velocità ed accelerazione di avvolgimento/svolgimento di ciascun cavo;
3. Angolo, velocità ed accelerazione di rotazione di ciascun rocchetto;
4. Tensioni nei cavi e coppie richieste ai motori mediante risoluzione del problema di programmazione lineare.

Nelle appendici è riportato lo script *Matlab* nel quale viene anche considerata la curva coppia vs velocità di rotazione di un motore e si effettua un controllo per assicurarsi di mantenere le coppie al di sotto di tale curva.

Si è scelto di fare riferimento ad un'area di altezza H x larghezza L pari a $3\text{ m} \times 2\text{ m}$. Non possedendo, in questa fase del progetto, le informazioni geometriche e di altro tipo necessarie per lo studio, i parametri richiesti per l'analisi sono stati ipotizzati:

- Dimensioni antenna: $h_a \times l_a = 100 \times 100 \text{ mm}$;
- Distanziamenti dei punti A_i dai bordi del fondo armadio: $j = k = 50 \text{ mm}$;
- Distanze minime dell'antenna dai bordi dell'area rettangolare descritta dai punti fissi A_i : $d_o = 20 \text{ mm}$, $d_{v_{inf}} = d_{v_{sup}} = 30 \text{ mm}$;

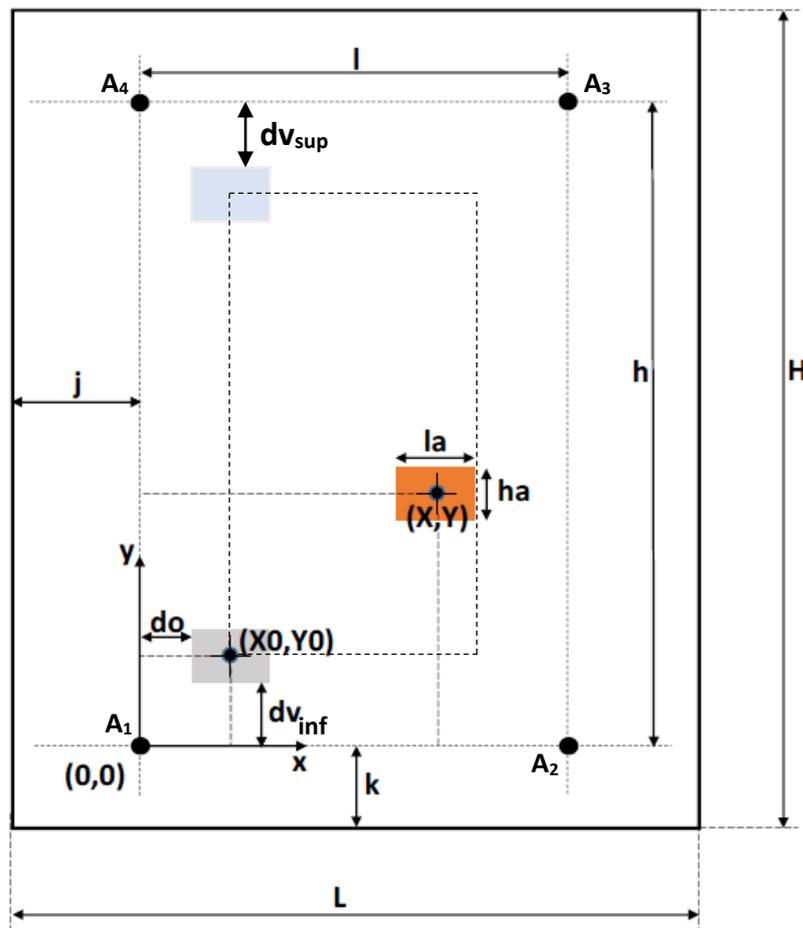


Figura 5.6: Riferimenti geometrici

- Raggio rocchetti: $r = 15 \text{ mm}$;
- Diametro del cono di lettura dell'antenna RFID: $p = 100 \text{ mm}$;
- Tempo di una corsa orizzontale: $T_{co} = 2 \text{ s}$;
- Tempo di una corsa verticale (tra due corse orizzontali): $T_{cv} = 0,5 \text{ s}$;
- Tempo della corsa di ritorno, dalla zona più alta fino al punto (X_0, Y_0) :
 $T_{cr} = 4 \text{ s}$;
- Massa dell'end-effector: $m = 0,5 \text{ kg}$;
- Inerzia rotazionale del gruppo motore-rocchetto: $J = 8 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$;
- Coefficiente di smorzamento viscoso del gruppo motore-rocchetto: $c = 0,01 \text{ Nms}$;
- Tensione minima nei cavi: $T_{MIN} = 1 \text{ N}$.

Dai risultati della simulazione si possono estrarre i seguenti grafici:

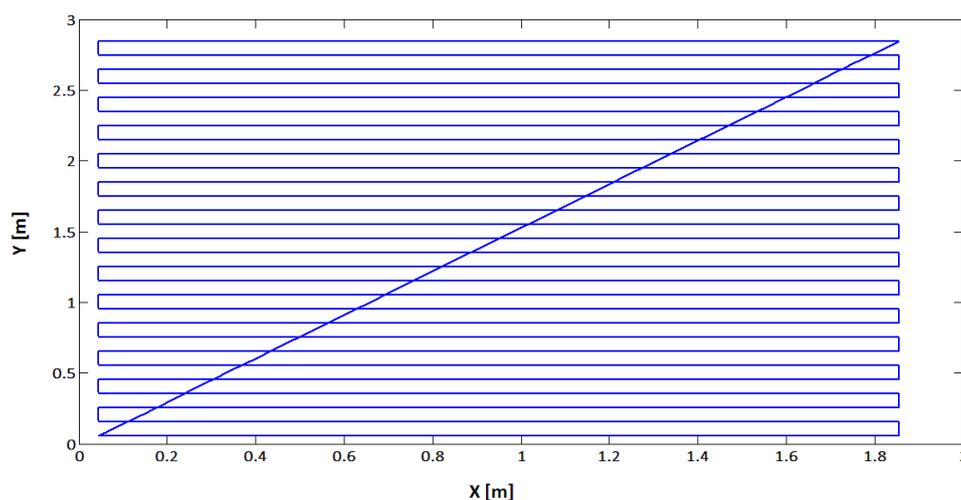


Figura 5.7: Percorso

- Il punto zero è stato posto in basso a sinistra. Il percorso dell'end-effector si sviluppa con una serpentina salendo verso l'alto e dopo aver raggiunto il punto più estremo ritorna alla posizione iniziale (*fig. 5.7*).
- A ciascun tratto di traiettoria corrisponde una legge di moto polinomiale di quinto grado che prevede l'annullamento delle velocità e delle accelerazioni agli estremi del tratto (*fig. 5.8 e 5.9*).

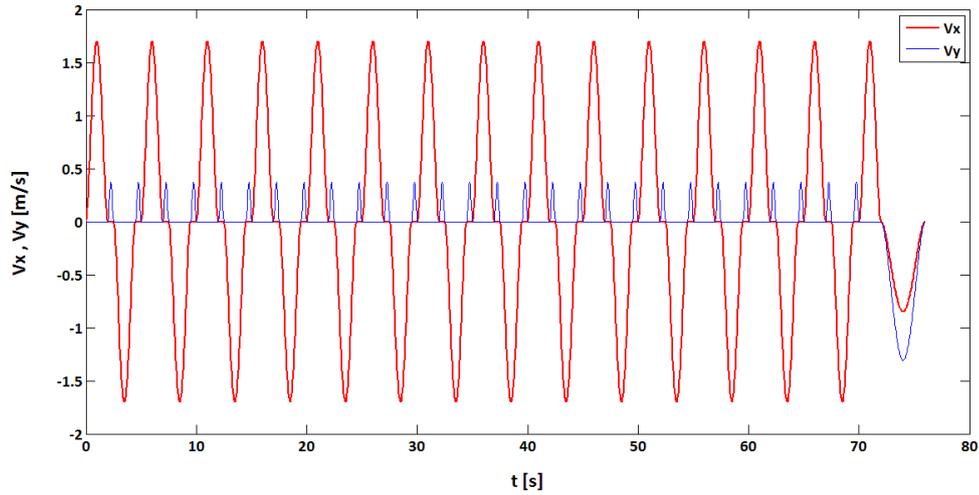


Figura 5.8: Velocità end-effector

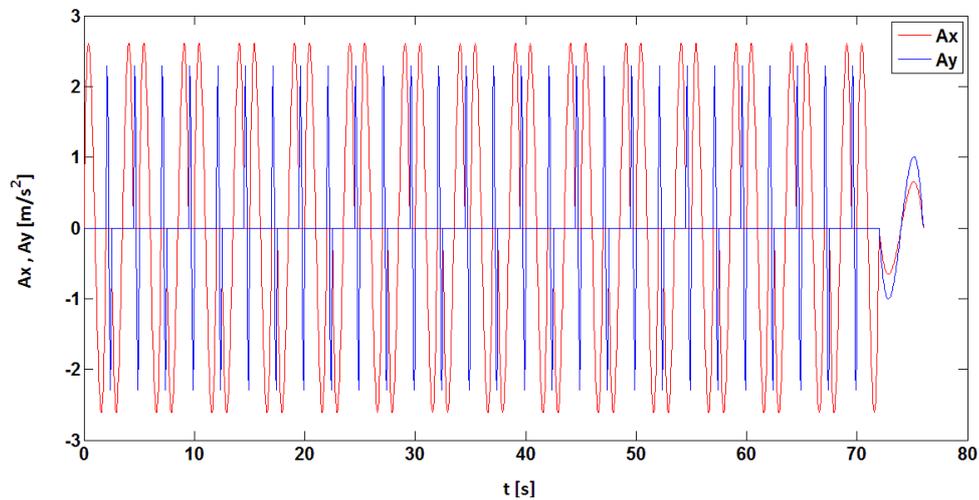


Figura 5.9: Accelerazione end-effector

- Anche velocità ed accelerazioni dei motori verificano la condizione di annullamento agli estremi di ogni corsa (*fig. 5.10*). Si noti che i motori 1 e 3, così come il 2 e il 4, lavorano sempre in opposizione: quando uno tira l'elemento terminale l'altro svolge cavo. Inoltre i motori 1 e 2 lavorano più velocemente nella parte inferiore del piano verticale e mano a mano che si sale le velocità diminuiscono. I motori 3 e 4 si comportano esattamente in modo contrario.

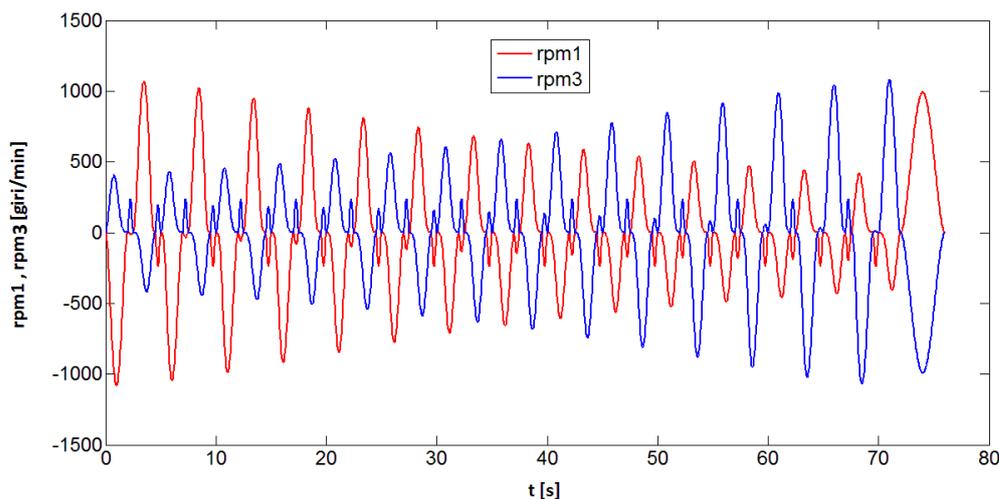


Figura 5.10: Velocità di rotazione dei motori 1 e 3

- Nei grafici 5.11 e 5.12 sono riportate le tensioni nei cavi 1 e 3 (le tensioni nei cavi 2 e 4 sono analoghe). I picchi, che aumentano progressivamente spostandosi verso la parte alta del piano, si trovano in corrispondenza delle corse verticali e raggiungono tensioni molto elevate (eccessive).

Per meglio rendersi conto del comportamento delle tensioni nei cavi al variare della posizione sul piano, è utile costruire dei grafici in condizioni statiche che mettano in evidenza le zone più gravose dell'area di lavoro (fig. 5.13, 5.14).

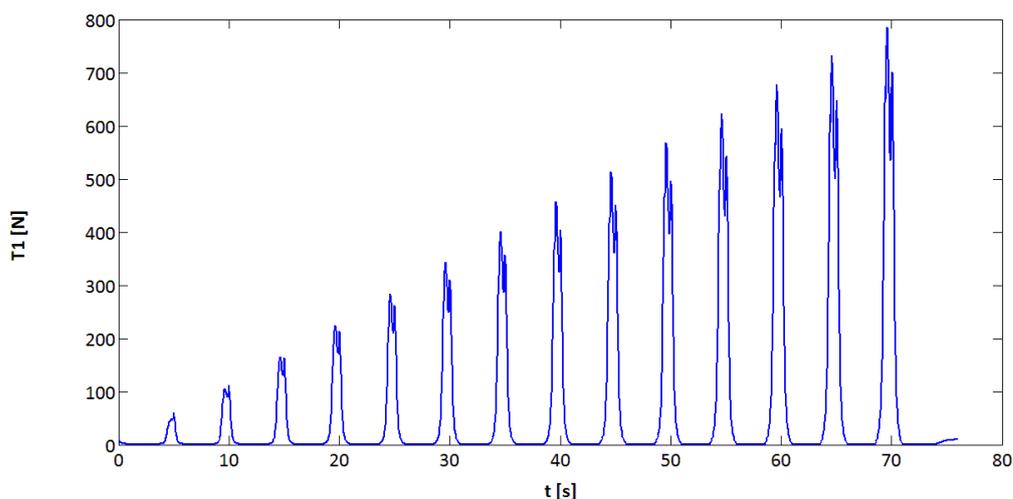


Figura 5.11: Tensione nel cavo 1

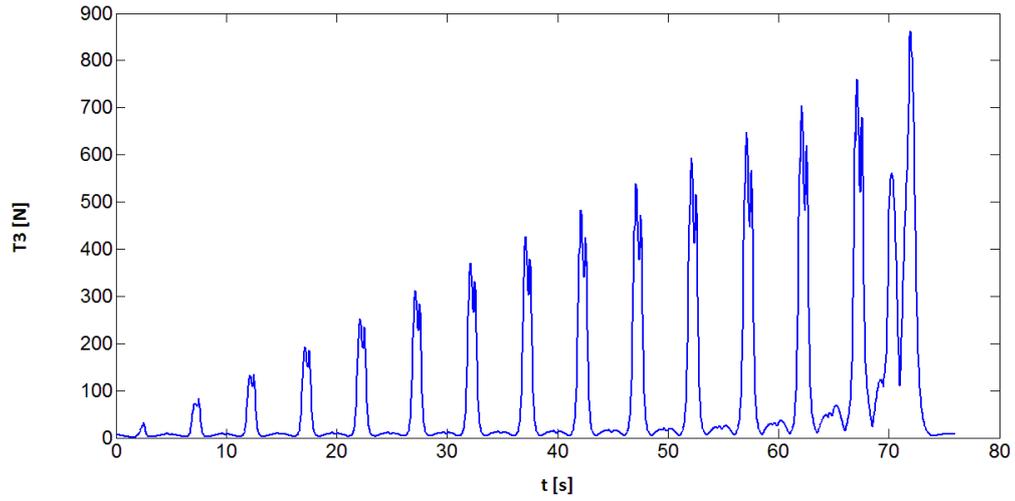


Figura 5.12: Tensione nel cavo 3

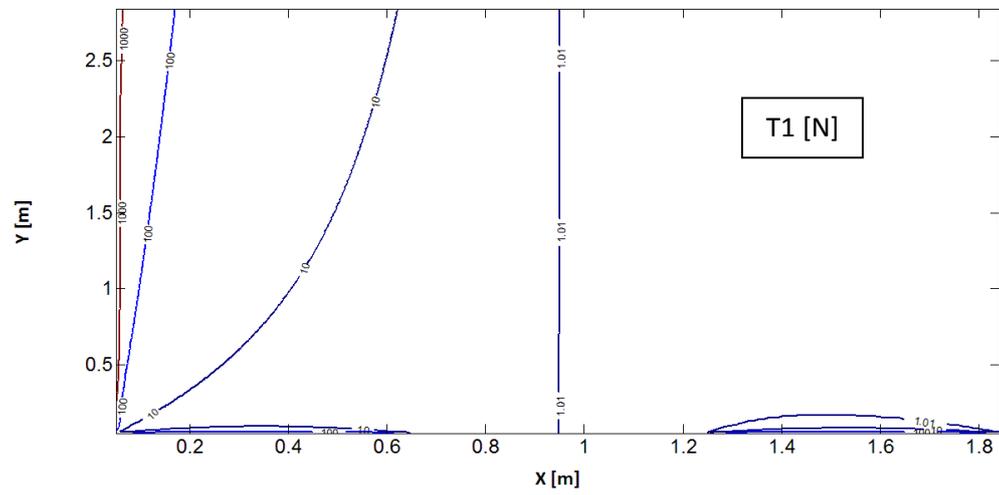


Figura 5.13: T1 in condizioni statiche

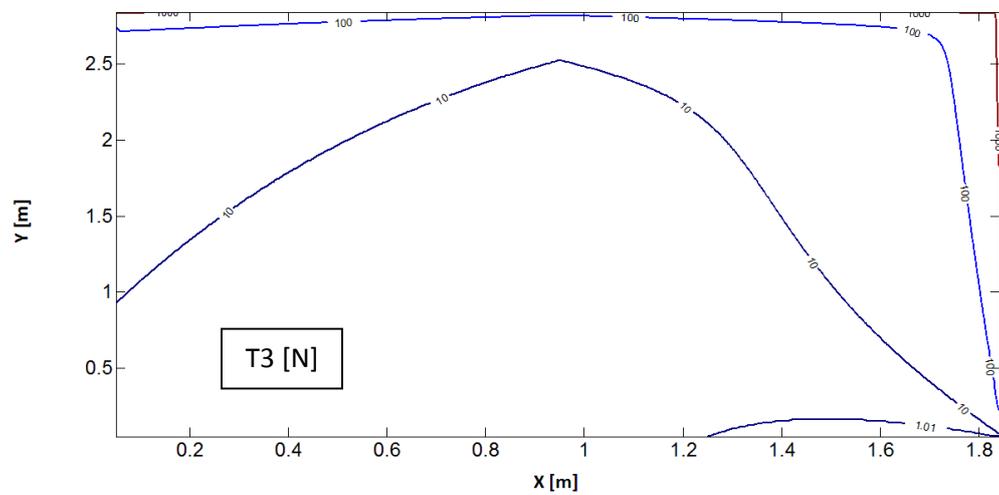


Figura 5.14: T3 in condizioni statiche

- Come si poteva intuire, le zone perimetrali sono le più critiche mentre l'area al centro del piano è decisamente più scarica. La minima tensione registrata è pari a $1 N$, come imposto nella programmazione lineare.

Per rientrare in un area di lavoro in cui le tensioni raggiungano valori accettabili, si dovrebbe restringere la zona da coprire con l'elemento terminale perdendo così una parte importante di spazio disponibile. In alternativa, le elevate tensioni calcolate possono essere ridotte significativamente se si accetta di non controllare l'inclinazione γ dell'elemento terminale.

5.5 Robot con cavi convergenti nel centro di massa

Imponendo la convergenza di ciascun cavo nel medesimo punto, corrispondente al centro di massa G dell'end-effector, si rende completamente libero il terzo grado di libertà associato alla rotazione nel piano. Si ha così un sistema a due gradi di libertà e con un grado di ridondanza; basterebbero infatti tre cavi per controllare completamente il meccanismo.

Un minor numero di gradi di libertà comporta una semplificazione delle leggi cinematiche e dinamiche precedentemente sviluppate. Si ripercorre ora l'analisi cinematica semplificata.

Lunghezza dei cavi:

$$L_i = \sqrt{(X - x_{A_i})^2 + (Y - y_{A_i})^2} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (5.25)$$

Lunghezza dei cavi all'istante iniziale $t_0 = 0$:

$$L_{0i} = \sqrt{(X_0 - x_{A_i})^2 + (Y_0 - y_{A_i})^2} \quad i = 1, \dots, 4$$

Cinematica inversa di posizione

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{Bmatrix} L_{01} - \sqrt{(X - x_{A_1})^2 + (Y - y_{A_1})^2} \\ L_{02} - \sqrt{(X - x_{A_2})^2 + (Y - y_{A_2})^2} \\ L_{03} - \sqrt{(X - x_{A_3})^2 + (Y - y_{A_3})^2} \\ L_{04} - \sqrt{(X - x_{A_4})^2 + (Y - y_{A_4})^2} \end{Bmatrix} \quad (5.26)$$

Cinematica inversa di velocità

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_3}{\partial x} & \frac{\partial \beta_3}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_4}{\partial x} & \frac{\partial \beta_4}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial x} = -\frac{X - x_{A_i}}{rL_i} ; \quad \frac{\partial \beta_i}{\partial y} = -\frac{Y - y_{A_i}}{rL_i}$$

Risulta:

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{X - x_{A_1}}{L_1} & \frac{Y - y_{A_1}}{L_1} \\ \frac{X - x_{A_2}}{L_2} & \frac{Y - y_{A_2}}{L_2} \\ \frac{X - x_{A_3}}{L_3} & \frac{Y - y_{A_3}}{L_3} \\ \frac{X - x_{A_4}}{L_4} & \frac{Y - y_{A_4}}{L_4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} \quad (5.28)$$

Cinematica inversa di accelerazione

$$\begin{aligned}
 \ddot{\boldsymbol{\beta}} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \right) \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \ddot{\mathbf{X}} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_3}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_4}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_4}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_3}{\partial x} & \frac{\partial \beta_3}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_4}{\partial x} & \frac{\partial \beta_4}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} \quad (5.29)
 \end{aligned}$$

Calcolo della derivata rispetto al tempo della derivata parziale in x :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial x} \right) = - \frac{L_i \dot{X} - (X - x_{A_i}) \dot{L}_i}{r L_i^2} \quad (5.30)$$

dove:

$$\dot{L}_i = \frac{(X - x_{A_i}) \dot{X} + (Y - y_{A_i}) \dot{Y}}{L_i}$$

sostituendo \dot{L}_i nella (5.29) si ottiene:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial x} \right) = - \frac{1}{r} \frac{L_i^2 - (X - x_{A_i})^2}{L_i^3} \dot{X} + \frac{1}{r} \frac{(X - x_{A_i})(Y - y_{A_i})}{L_i^3} \dot{Y} \quad (5.31)$$

Calcolo della derivata rispetto al tempo della derivata parziale in y :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial y} \right) = - \frac{L_i \dot{Y} - (Y - y_{A_i}) \dot{L}_i}{r L_i^2} \quad (5.32)$$

sostituendo \dot{L}_i nella (5.30) si ottiene:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial \dot{y}} \right) = -\frac{1}{r} \frac{L_i^2 - (Y - y_{A_i})^2}{L_i^3} \dot{Y} + \frac{1}{r} \frac{(X - x_{A_i})(Y - y_{A_i})}{L_i^3} \dot{X} \quad (5.33)$$

Infine si ha:

$$\begin{aligned} \ddot{\beta} = & -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{L_1^2 - (X - x_{A_1})^2}{L_1^3} & \frac{L_1^2 - (Y - y_{A_1})^2}{L_1^3} \\ \frac{L_2^2 - (X - x_{A_2})^2}{L_2^3} & \frac{L_2^2 - (Y - y_{A_2})^2}{L_2^3} \\ \frac{L_3^2 - (X - x_{A_3})^2}{L_3^3} & \frac{L_3^2 - (Y - y_{A_3})^2}{L_3^3} \\ \frac{L_4^2 - (X - x_{A_4})^2}{L_4^3} & \frac{L_4^2 - (Y - y_{A_4})^2}{L_4^3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}^2 \\ \dot{Y}^2 \end{Bmatrix} \\ & + \frac{2}{r} \begin{bmatrix} \frac{(X - x_{A_1})(Y - y_{A_1})}{L_1^3} \\ \frac{(X - x_{A_2})(Y - y_{A_2})}{L_2^3} \\ \frac{(X - x_{A_3})(Y - y_{A_3})}{L_3^3} \\ \frac{(X - x_{A_4})(Y - y_{A_4})}{L_4^3} \end{bmatrix} \dot{X} \dot{Y} - \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{X - x_{A_1}}{L_1} & \frac{Y - y_{A_1}}{L_1} \\ \frac{X - x_{A_2}}{L_2} & \frac{Y - y_{A_2}}{L_2} \\ \frac{X - x_{A_3}}{L_3} & \frac{Y - y_{A_3}}{L_3} \\ \frac{X - x_{A_4}}{L_4} & \frac{Y - y_{A_4}}{L_4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} \quad (5.34) \end{aligned}$$

Per quanto riguarda lo studio dinamico, la (5.18) diviene:

$$\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{Bmatrix} = r \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + J\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \\ \ddot{\beta}_3 \\ \ddot{\beta}_4 \end{Bmatrix} + c\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \\ \dot{\beta}_3 \\ \dot{\beta}_4 \end{Bmatrix} - r \begin{Bmatrix} 0 \\ -P \end{Bmatrix} \quad (5.35)$$

$$\text{con } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 & -\cos \theta_3 & -\cos \theta_4 \\ -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & -\sin \theta_3 & -\sin \theta_4 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Per il calcolo delle coppie τ_i , il problema presenta questa volta ∞^2 soluzioni e si impiega ancora la programmazione lineare con le equazioni e disequazioni già esposte.

Con gli stessi valori dei parametri geometrici, si quantifica, in *fig. 5.15 e 5.16*, il carico sui cavi e si osserva come le tensioni siano sensibilmente inferiori rispetto al caso precedente.

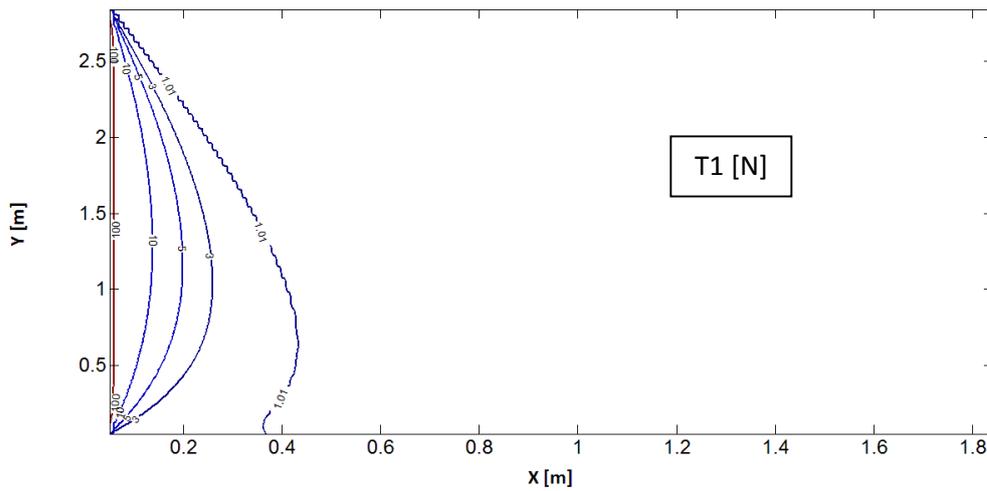


Figura 5.15: T1 in condizioni statiche

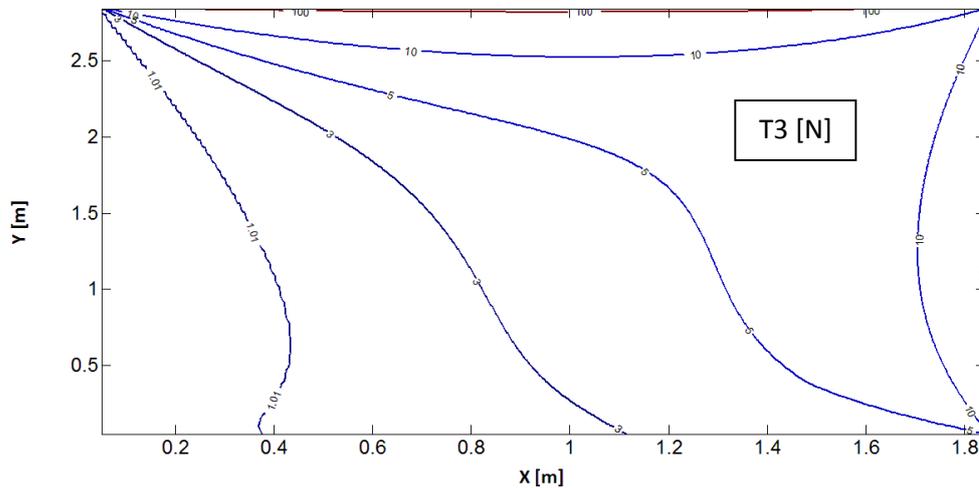


Figura 5.16: T3 in condizioni statiche

Ciò è confermato dall'andamento delle tensioni lungo la traiettoria, come si può vedere nelle *figure 5.17 e 5.18*.

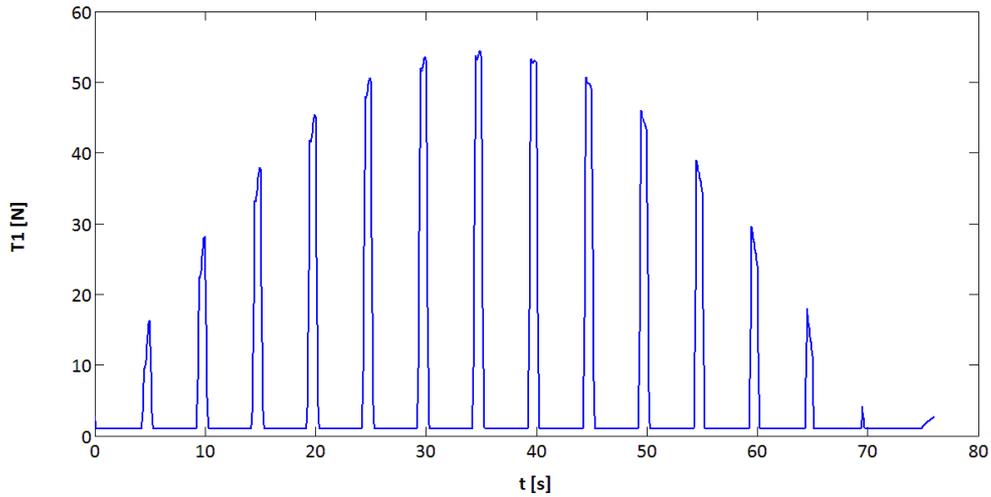


Figura 5.17: Tensione nel cavo 1

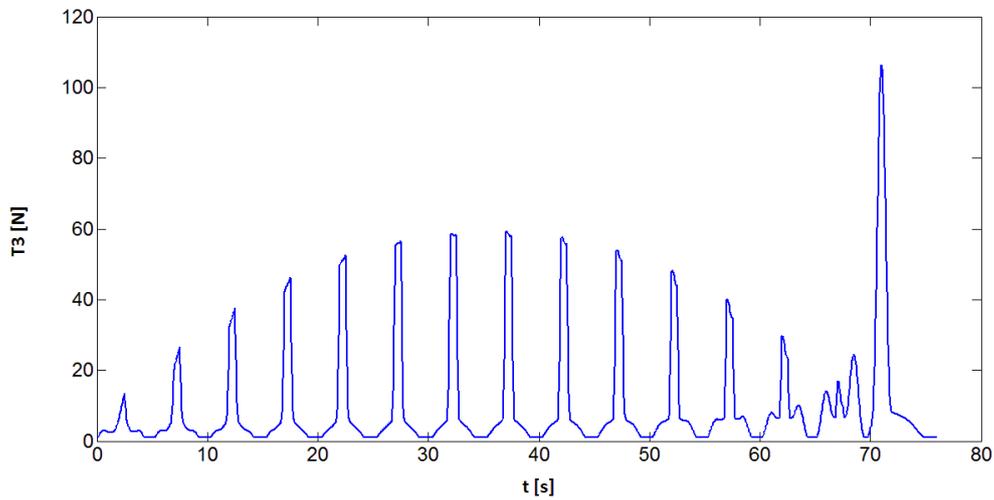


Figura 5.18: Tensione nel cavo 3

Le coppie richieste ai motori sono riportate nelle figure 5.19 e 5.20. E' evidente che l'andamento delle due curve è analogo ma invertito, con la differenza però che il cavo 3 richiede un maggior intervento da parte del proprio attuatore quando incontra il picco di tensione riscontrato nelle corse più vicine alla parte alta del pannello.

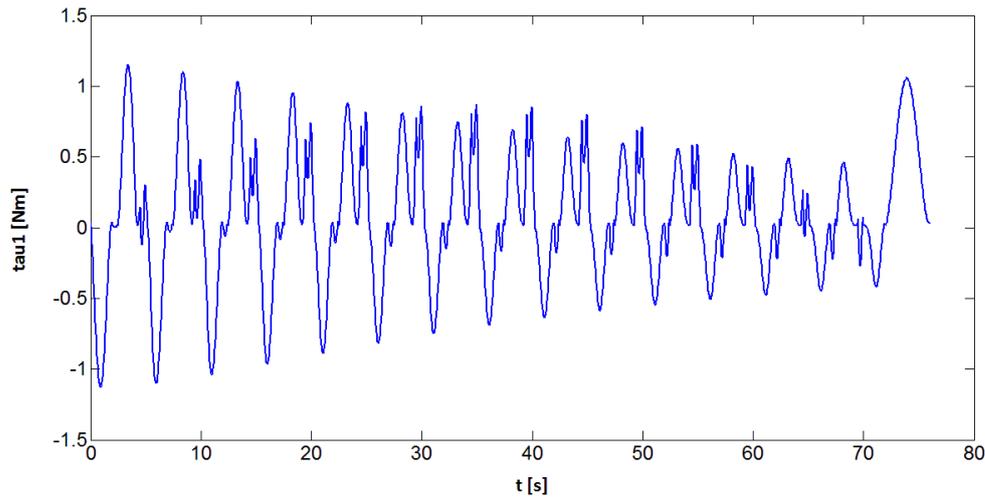


Figura 5.19: Coppia motore 1

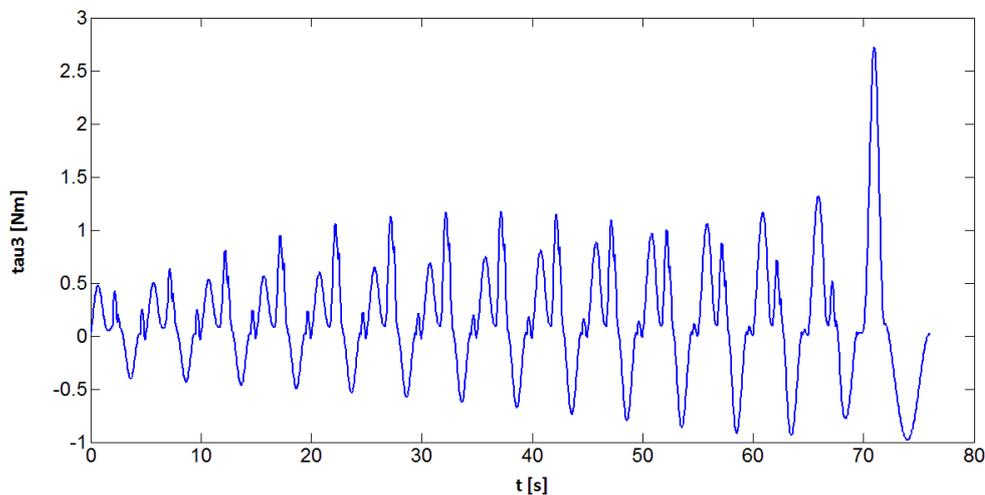


Figura 5.20: Coppia motore 3

Osservando *fig. 5.19* si vede che la coppia richiesta al motore 1 non rispecchia l'andamento della tensione nel cavo e si raggiungono valori elevati anche laddove la tensione è minima. Ciò è dovuto al contributo di smorzamento viscoso che si fa sentire soprattutto quando si viaggia a velocità elevate. In *fig. 5.21* è illustrato come cambia la coppia τ_{1} annullando il coefficiente c .

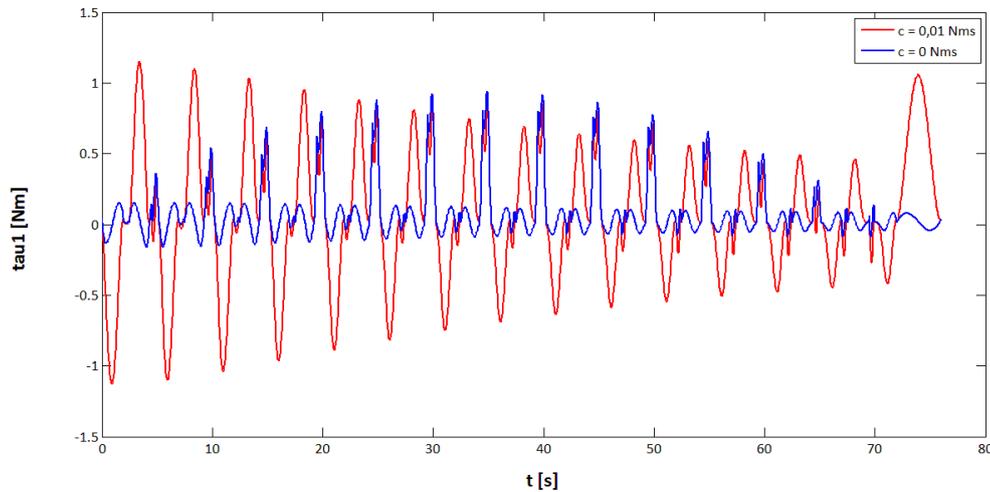


Figura 5.21: Influenza dello smorzamento viscoso

I tempi imposti per percorrere le corse sono piuttosto bassi ed implicano delle condizioni di moto abbastanza spinte. La massima velocità di traslazione dell'end-effector sarà molto probabilmente legata al tempo minimo necessario all'antenna RFID per identificare in modo certo ogni oggetto. Questa velocità massima è per ora difficile da stimare poiché dipenderà da diversi fattori come il tipo di antenna RFID, tipologia e quantità di oggetti presenti nell'armadio. È quindi presumibile che le velocità massime raggiungibili saranno inferiori ed i tempi dovranno essere dilatati con conseguente allungamento del tempo ciclo totale. In quest'ottica si può pensare che le coppie richieste saranno inferiori perché sarà inferiore la resistenza dovuta a smorzamento viscoso il quale è legato alle velocità.

Se si volesse avere una sensibile riduzione delle coppie, a parità di legge di moto imposta, si dovrebbe agire sui parametri do e dv_{sup} per mantenersi più lontani dai bordi del pannello restringendo quindi l'area di lavoro. L'aumento di do comporta una diminuzione delle tensioni raggiunte durante le corse verticali (fig. 5.22), mentre aumentare dv_{sup} significa ottenere una riduzione della sollecitazione quando si lavora nella parte alta del piano (fig. 5.23).

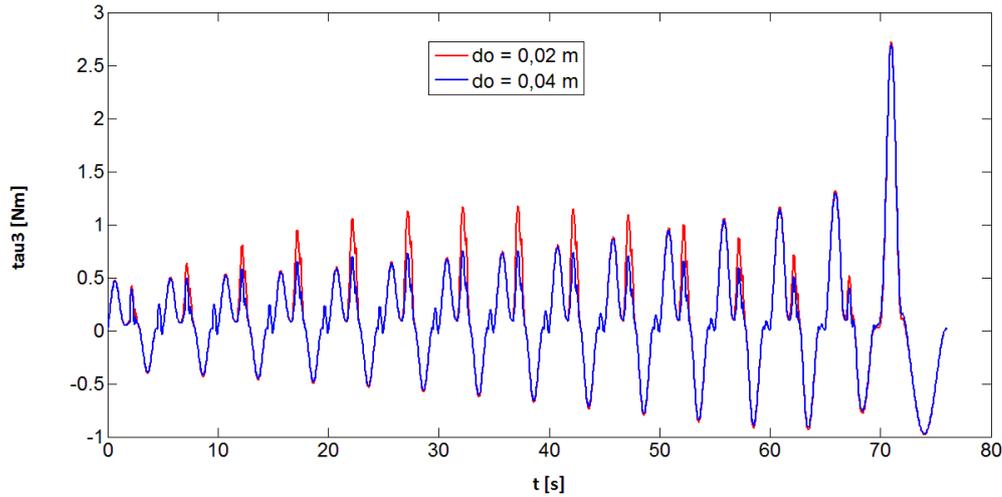


Figura 5.22: Influenza del parametro d_o

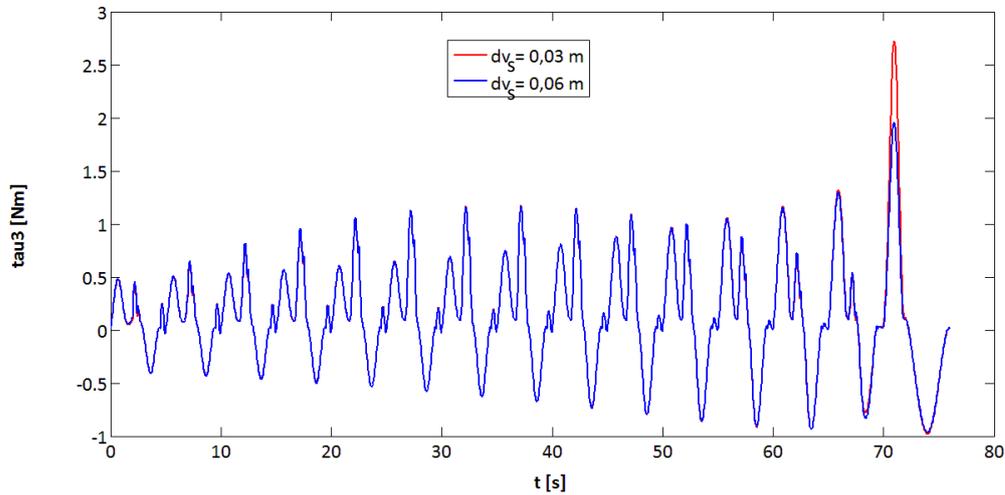


Figura 5.23: Influenza del parametro dv_{sup}

Le ultime considerazioni (su dilatazione dei tempi di percorrenza e restringimento dell'area di lavoro al fine di diminuire le coppie motrici) sono da farsi nel momento in cui valga la pena puntare ad una taglia inferiore dei motori con l'obiettivo di ridurre costi e/o ingombri. Si deve cioè ponderare una scelta di compromesso tra riduzione dei carichi da una parte e maggior area di lettura dall'altra.

5.5 Conclusioni

In questo capitolo è stato analizzato un robot comandato da quattro attuatori che governano l'allungamento di altrettanti cavi.

Nella prima configurazione a tre gradi di libertà si è riscontrato un tensionamento eccessivo dei cavi quando si vogliono raggiungere punti vicini al perimetro rettangolare del piano di lettura. Per limitare le tensioni dei cavi entro un range accettabile si dovrebbe restringere sensibilmente l'area di lavoro mantenendo una certa distanza dai bordi del piano.

Un interessante alternativa per ridurre sensibilmente l'entità delle tensioni consiste nel convergere in un unico punto di aggancio (centro di massa G) le estremità dei quattro cavi. Facendo ciò si perde il controllo del terzo grado di libertà, corrispondente alla rotazione dell'end-effector nel piano, ma si beneficia di un importante riduzione del carico dei cavi senza dover ricorrere al restringimento dell'area di lavoro.

CAPITOLO 6

ROBOT PLANARE A DUE CAVI

Un robot movimentato da $N = 2$ cavi convergenti in un punto e vincolato a muoversi su un piano verticale è caratterizzato da $n = 2$ gradi di libertà corrispondenti a: traslazione orizzontale (asse x) e traslazione verticale (asse y). Il terzo grado di libertà, cioè la rotazione sul piano dell'end-effector, viene lasciata libera. Il numero di gradi di libertà è pari al numero dei cavi e pertanto il robot in questione è sottovincolato; infatti, seppur soggetto alla forza peso, il robot non è in grado di mantenere in ogni circostanza i cavi ben tesi.

In *fig. 5.1* è illustrato lo schema del robot.

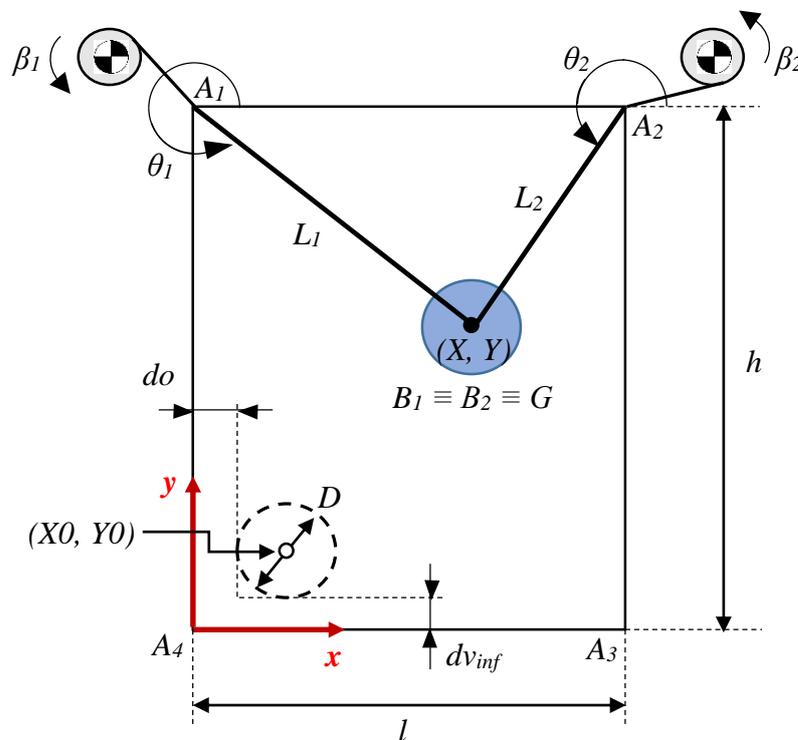


Figura 6.1: Schema Robot a 2 Cavi

Il percorso dell'elemento terminale è lo stesso di quello visto nel capitolo precedente per il robot a quattro cavi: una serie di tratti rettilinei orizzontali e verticali che si alternano per coprire il piano di lavoro dal basso verso l'alto. La legge di moto per ciascun tratto viene scelta, come prima, polinomiale di grado cinque.

6.1 Analisi cinematica e dinamica

Lo studio è lo stesso visto nel capitolo precedente specificatamente al caso di cavi convergenti nel centro di massa. Questa volta le cose si semplificano ulteriormente in quanto il numero dei cavi è inferiore: $N = 2$ cavi.

Cinematica inversa di posizione

Lunghezza dei cavi:

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{(X - x_{A_1})^2 + (Y - y_{A_1})^2} \\ L_2 &= \sqrt{(X - x_{A_2})^2 + (Y - y_{A_2})^2} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Lunghezza dei cavi all'istante iniziale $t = 0$:

$$\begin{aligned} L_{01} &= \sqrt{(X0 - x_{A_1})^2 + (Y0 - y_{A_1})^2} \\ L_{02} &= \sqrt{(X0 - x_{A_2})^2 + (Y0 - y_{A_2})^2} \end{aligned}$$

dove $X0 = d_0 + D/2$, $Y0 = d_{vinf} + D/2$.

Legge cinematica inversa di posizione:

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{Bmatrix} L_{01} - \sqrt{(X - x_{A_1})^2 + (Y - y_{A_1})^2} \\ L_{02} - \sqrt{(X - x_{A_2})^2 + (Y - y_{A_2})^2} \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

Cinematica inversa di velocità

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{X - x_{A_1}}{L_1} & \frac{Y - y_{A_1}}{L_1} \\ \frac{X - x_{A_2}}{L_2} & \frac{Y - y_{A_2}}{L_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} \quad (6.3)$$

Cinematica inversa di accelerazione

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\beta}} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \right) \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \mathbf{X}} \ddot{\mathbf{X}} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_1}{\partial y} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial x} \right) & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial x} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_2}{\partial x} & \frac{\partial \beta_2}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} \\ &= -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{L_1^2 - (X - x_{A_1})^2}{L_1^3} & \frac{L_1^2 - (Y - y_{A_1})^2}{L_1^3} \\ \frac{L_2^2 - (X - x_{A_2})^2}{L_2^3} & \frac{L_2^2 - (Y - y_{A_2})^2}{L_2^3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}^2 \\ \dot{Y}^2 \end{Bmatrix} \\ &\quad + \frac{2}{r} \begin{bmatrix} \frac{(X - x_{A_1})(Y - y_{A_1})}{L_1^3} \\ \frac{(X - x_{A_2})(Y - y_{A_2})}{L_2^3} \end{bmatrix} \dot{X}\dot{Y} - \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{X - x_{A_1}}{L_1} & \frac{Y - y_{A_1}}{L_1} \\ \frac{X - x_{A_2}}{L_2} & \frac{Y - y_{A_2}}{L_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} \quad (6.4) \end{aligned}$$

Studio dinamico

$$\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} = r \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + J\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \end{Bmatrix} + c\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \end{Bmatrix} - r \begin{Bmatrix} 0 \\ -P \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$

$$\text{con } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$

Si noti che \mathbf{S} è una matrice quadrata 2x2 ed è quindi invertibile. Pertanto le coppie richieste ai due motori sono direttamente calcolabili:

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \left(r \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + J\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \end{Bmatrix} + c\mathbf{S} \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \end{Bmatrix} - r \begin{Bmatrix} 0 \\ -P \end{Bmatrix} \right) \quad (6.7)$$

Le tensioni nei cavi valgono:

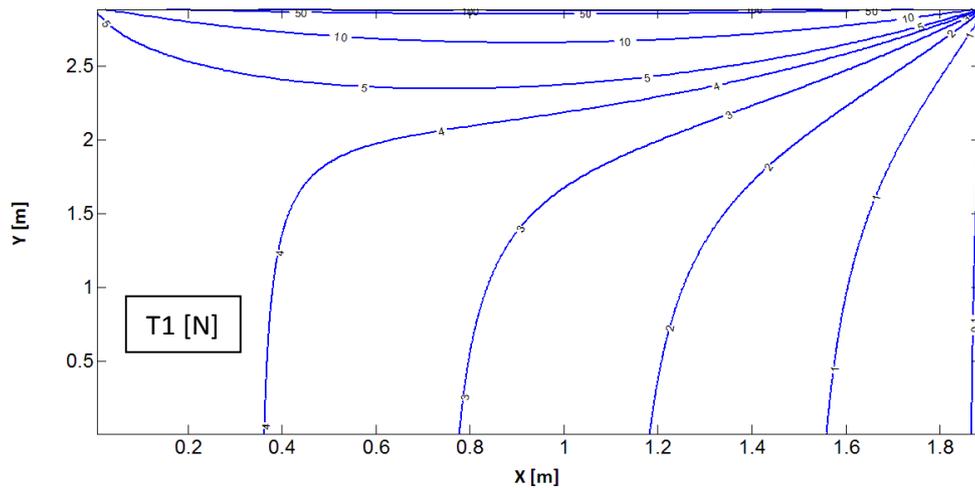
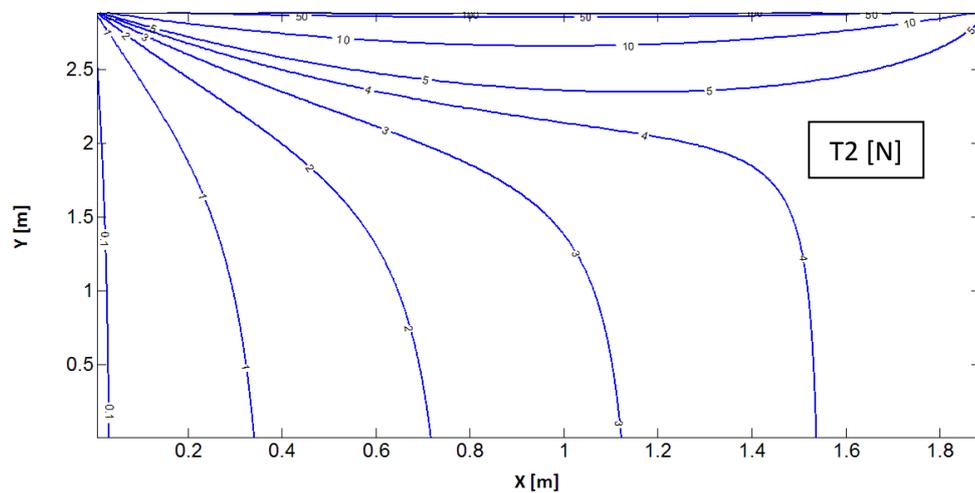
$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{r} \left[\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} - c \begin{Bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \end{Bmatrix} - J \begin{Bmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \end{Bmatrix} \right] \quad (6.8)$$

6.2 Confronto robot 2 cavi vs. robot 4 cavi

Il confronto che segue avviene a parità di leggi cinematiche descrittive il moto dell'elemento terminale, impiegando gli stessi valori per le grandezze geometriche e temporali ipotizzate nel capitolo cinque. L'unica differenza geometrica sta nella forma dell'end-effector che qui si considera circolare con diametro $D = 0,1 \text{ m}$.

Gli script usati per svolgere l'analisi al calcolatore differiscono di poco da quelli precedentemente sviluppati; essi risultano più semplici in quanto non si ricorre alla programmazione lineare ed il numero di variabili da trovare è inferiore.

Per prima cosa si osserva il tensionamento dei due cavi in condizioni statiche sul piano di lavoro (*fig. 6.2 e 6.3*).


 Figura 6.2: T_1 in condizioni statiche

 Figura 6.3: T_2 in condizioni statiche

- Si nota che con il robot a due cavi si hanno un minor numero di zone critiche: solo la fascia alta del piano di lavoro prevede il raggiungimento di tensioni particolarmente elevate;
- In condizioni statiche le tensioni dei due cavi risultano sempre positive o nulle, in qualsiasi punto interno all'area di lavoro rettangolare.

In condizioni dinamiche alla componente statica si aggiunge una componente inerziale; lungo la traiettoria descritta dall'elemento terminale il carico sui cavi varia come mostrato nelle *figure 6.4 e 6.5*.

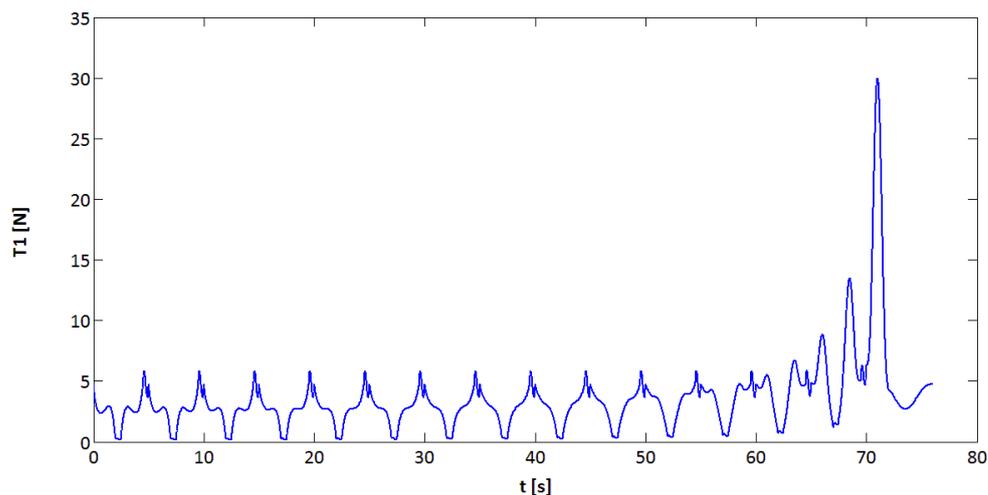


Figura 6.4: Tensione nel cavo 1

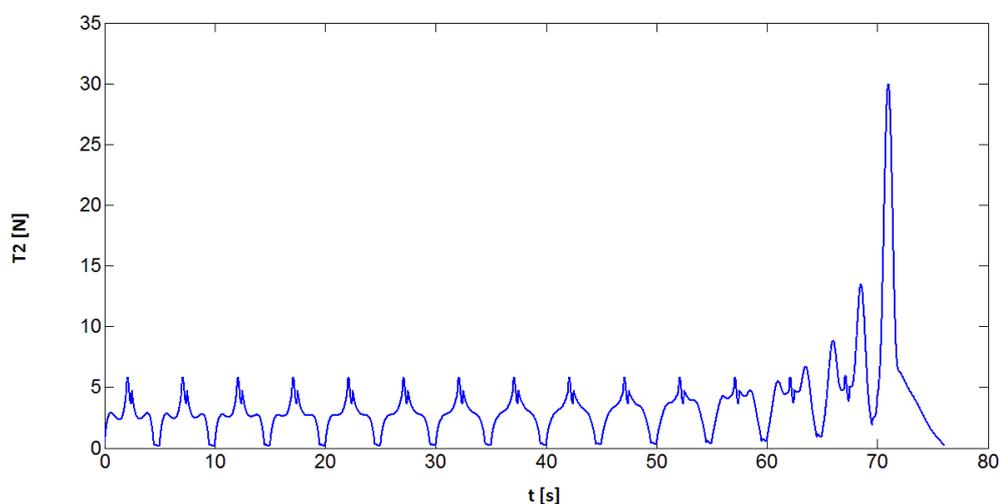


Figura 6.5: Tensione nel cavo 2

- Durante le corse verticali vicine ai bordi dell'area di lavoro e nella zona medio-bassa del piano, lo sforzo per il sollevamento dell'elemento terminale viene esercitato sostanzialmente da un solo attuatore;
- I valori di tensione raggiunti con la configurazione a due cavi sono nettamente inferiori rispetto a quelli del robot comandato da quattro cavi. Nel caso in esame, durante quasi tutto il percorso dell'elemento terminale le tensioni arrivano al massimo a circa 5 N (circa pari al peso dell'end-effector) e solo durante le ultime corse si ha un incremento del carico che non supera i 30 N.

Si valutano infine le coppie richieste ai due motori, *fig. 6.6 e 6.7.*

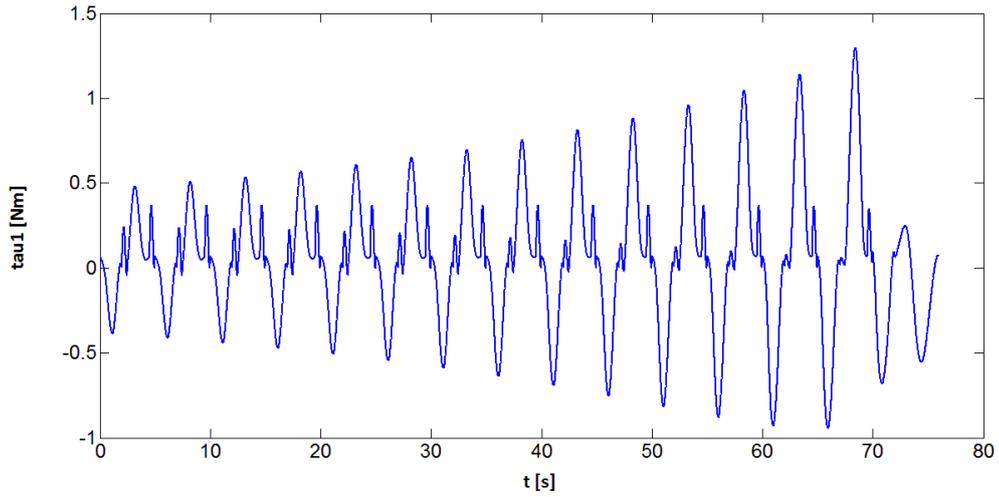


Figura 6.6: Coppia motore 1

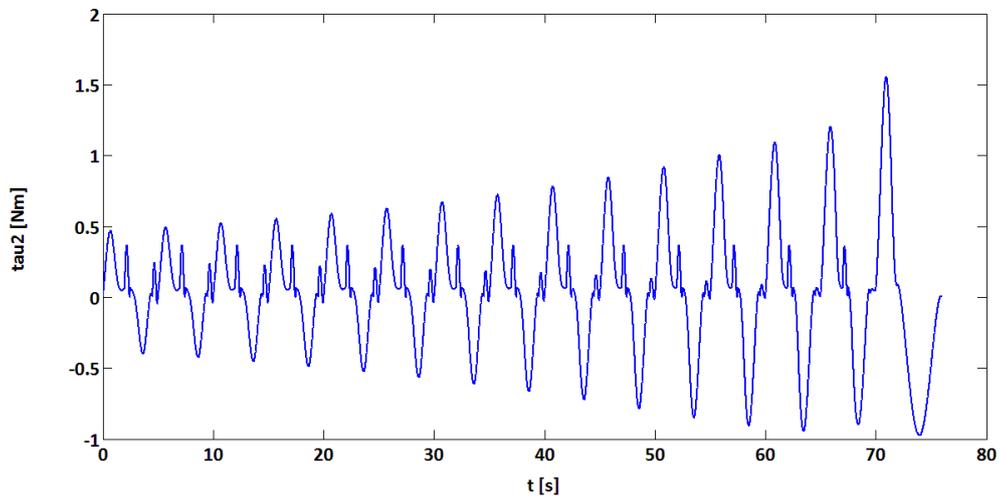


Figura 6.7: Coppia motore 2

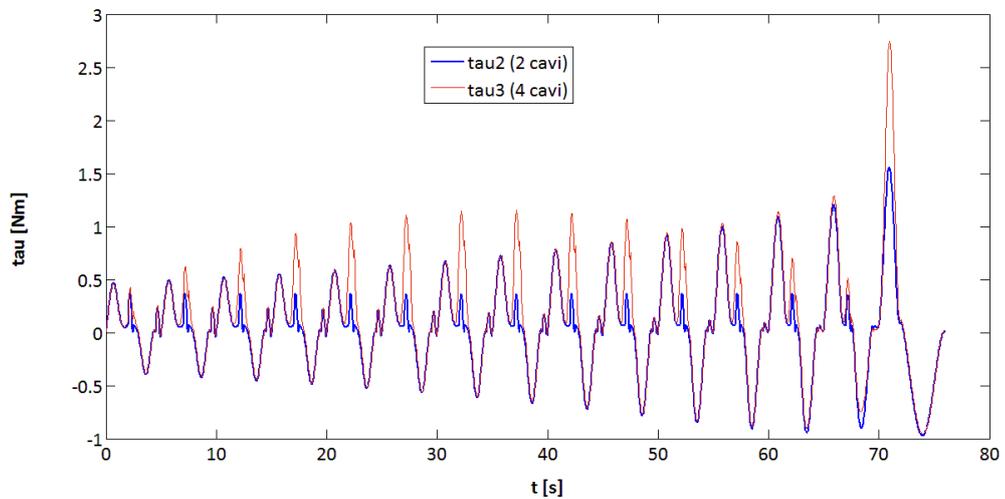


Figura 6.8: Confronto di coppie

- Se si confronta la coppia richiesta al motore 2 (τ_2) del robot a due cavi con la coppia del motore 3 del robot a quattro cavi, ci si accorge che le due curve differiscono solo durante i tratti di corsa verticale e i tratti orizzontali più vicini al bordo superiore del piano (vedi *fig. 6.8*). Ciò avviene perché, quando ci si avvicina al perimetro rettangolare, nel robot controllato da quattro attuatori vi sono sempre due cavi opposti in tensione che provocano un aumento del lavoro dei due cavi più allineati.

6.3 Conclusioni e considerazioni

Dal confronto fra la configurazione a quattro cavi e la configurazione attuata da soli due motori è risultato che la seconda soluzione è sicuramente la più indicata se si mira a minimizzare lo sforzo richiesto ai motori.

Un robot movimentato mediante quattro cavi è sicuramente più stabile grazie alla possibilità di regolarne sempre il tensionamento; ciò permette anche di:

- Non risentire, o minimizzare, l'influenza del cavo dell'antenna RFID che deve essere trascinato durante il percorso;
- Raggiungere velocità ed accelerazioni più elevate senza il rischio di rilassare troppo i cavi e perdere il controllo del robot;

D'altra parte, l'impiego di quattro attuatori comporta ovviamente dei costi maggiori rispetto alla configurazione a due cavi. Inoltre, le coppie necessarie per mantenere il giusto tensionamento richiedono dei motori più performanti che si traducono in costi più elevati. Un altro svantaggio si riscontra in relazione all'estensione dell'area che si è in grado di coprire: rispetto alla soluzione a due cavi, occorre mantenersi più lontani dai bordi del piano di lavoro a causa degli eccessivi carichi che altrimenti insorgono.

Accettando di dover far fronte ad una maggior instabilità, unita ad un contributo difficilmente prevedibile conseguente alla movimentazione del cavo RFID, sarà in seguito sviluppata la configurazione con due soli attuatori. Si preferisce infatti beneficiare della maggior semplicità realizzativa e degli inferiori costi di produzione dovuti al minor numero di motori e di schede di controllo

impiegate. C'è poi un altro aspetto che contribuisce ad optare per questa scelta: più avanti verrà giustificata la selezione del motore passo-passo come tipologia degli attuatori da installare. Lo step motor si controlla generalmente in posizione e se si adottasse la configurazione a quattro cavi si sarebbe orientati ad un controllo in coppia, più difficilmente realizzabile.

CAPITOLO 7

SCELTA DEGLI ATTUATORI ELETTRICI

In questo capitolo si perviene alla scelta della tipologia dei motori elettrici che verranno impiegati per l'avvolgimento/svolgimento dei cavi. Si descriveranno in linea generale i possibili tipi di motore adatti al mondo dell'automazione in modo da individuare quello più confacente alle esigenze richieste da questo progetto.

7.1 I servomotori elettrici

Nel campo dell'automazione ed in particolare nell'ambito di meccanismi robotizzati, ad un asse elettrico sono spesso richieste condizioni operative soggette ad ampie e repentine variazioni sia di velocità che di coppia motrice, alle quali si deve adattare con la massima rapidità e precisione. Ciò è reso possibile grazie all'impiego dei motori per azionamenti (o servomotori) elettrici. Essi possono essere distinti in:

- Motore ad induzione (asincrono)
- Motore in corrente continua
- Motore brushless
- Motore passo-passo

Un motore elettrico rotativo è una macchina che converte energia elettrica in energia meccanica e generalmente si compone di una parte fissa (statore) e di una mobile (rotore). Le parti fissa e mobile interagiscono tramite il campo

elettromagnetico prodotto dall'alimentazione del motore; quest'iterazione si traduce in una coppia disponibile all'asse del rotore.

7.1.1 Motore asincrono

La macchina asincrona è il motore elettrico in corrente alternata di più largo impiego grazie alla sua semplicità costruttiva, la sicurezza di esercizio, la scarsa manutenzione richiesta e l'economicità. Il movimento del rotore consegue alla rotazione del campo magnetico generato dallo statore. Quest'ultimo presenta una, due oppure tre fasi di alimentazione ognuna delle quali è costituita da una o più coppie polari: due avvolgimenti opposti rispetto all'asse del motore e collegati in serie.

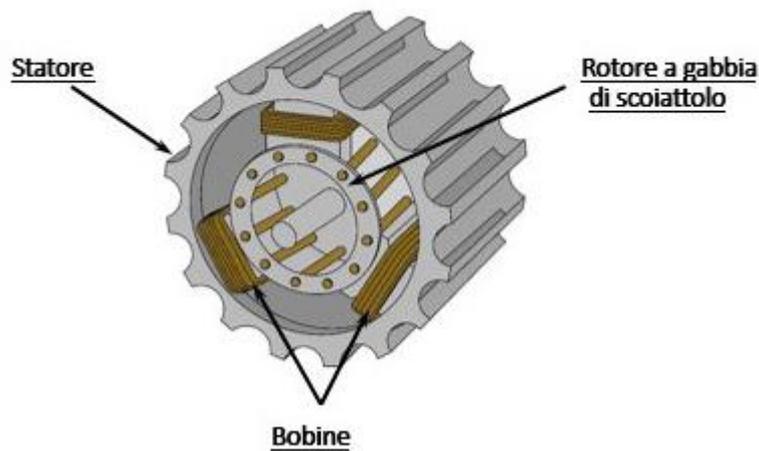


Figura 7.1: Esempio di Motore Asincrono

Gli avvolgimenti di statore sono alimentati con correnti alternate che, grazie allo sfasamento, producono un campo magnetico rotante che ruota alla velocità fissa n_s legata alla frequenza di alimentazione f :

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \left[\frac{\text{giri}}{\text{min}} \right] \quad (7.1)$$

dove p è pari al numero di coppie polari presenti in una fase dello statore. Quindi se si ha una sola coppia polare: $p = 1, f = 50 \text{ Hz}$ (rete) e $n_s = 3000 \text{ rpm}$.

Il rotore, che può essere avvolto o a gabbia di scoiattolo, è dotato di un certo numero di fasi, di norma chiuse in corto circuito, in ciascuna delle quali viene indotta una corrente conseguente alla rotazione del campo magnetico di statore. Queste correnti producono a loro volta un campo magnetico (rotante rispetto al rotore) che si oppone a quello generato dallo statore, pone in movimento il rotore con velocità n_r e genera una coppia motrice in equilibrio con la coppia resistente. Si ha $n_r = n_s$ solo quando la coppia resistente è nulla, ma questo non avviene mai perché sono sempre presenti fenomeni di attrito che si oppongono alla rotazione. Perciò il rotore girà sempre ad una velocità inferiore rispetto alla velocità di sincronismo n_s , esiste cioè uno scorrimento s che vale:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (7.2)$$

Maggiore è il carico agganciato al motore, maggiore è lo scorrimento ed il motore rallenta. In *fig. 7.2* si può vedere una tipica curva di coppia di un motore asincrono.

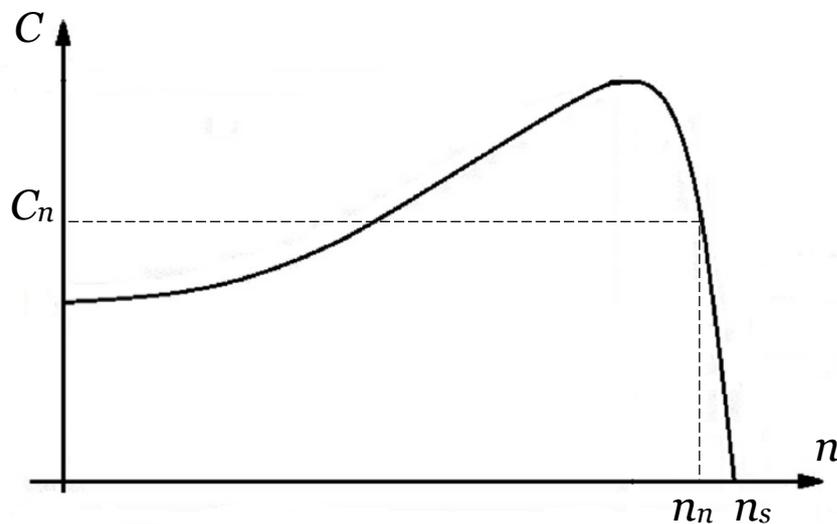


Figura 7.2: Curva caratteristica del motore asincrono

Il punto di funzionamento nominale (n_n , C_n) corrisponde al limite in corrispondenza del quale si ha un equilibrio termico con un certo ΔT di temperatura superiore alla temperatura ambiente in condizioni standard. Oltre questo limite, cioè per coppie superiori a C_n e velocità inferiori a n_n , il motore si

surriscalda troppo. Il motore asincrono dunque deve lavorare a velocità che oscillano tra quella nominale e quella di sincronismo con scorrimento massimo di circa 4%. Si può superare il punto nominale ed attingere ad una coppia di spunto maggiore solo se il periodo di permanenza in tali condizioni è inferiore alla costante di tempo termica del motore.

Per i motivi appena descritti, questa macchina di per sé è un motore a velocità sostanzialmente costante, prossima a n_s . Se però si agisce sulla frequenza f mediante un convertitore statico di frequenza (inverter), la curva caratteristica trasla parallelamente a sé stessa ed il motore asincrono è in grado di lavorare a velocità diverse. Ciò comporta che per variare la velocità con continuità occorre variare corrispondentemente la frequenza di alimentazione. In realtà l'inverter deve agire anche sulla tensione di alimentazione aumentandola o diminuendola con l'aumentare o il diminuire della frequenza. Inoltre sopra i 50 Hz la coppia nominale cala (fig. 7.3).

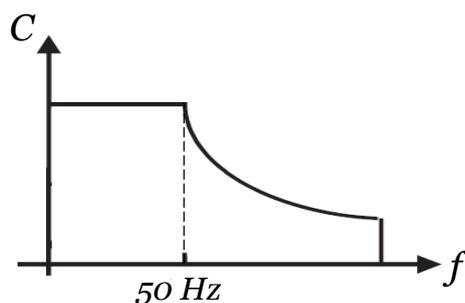


Figura 7.3: Coppia in funzione della frequenza di alimentazione

Il motore asincrono ha tendenzialmente un'elevata inerzia rotorica e non sarebbe quindi adatto a cambi di velocità molto rapidi. Esistono però degli asincroni progettati con diametro ridotto ed estensione allungata in modo da minimizzare l'inerzia e renderli più adatti all'automazione.

Se da una parte il costo del motore è contenuto, dall'altra si aggiunge la spesa per l'inverter ed il costo di un trasduttore di posizione. Complessivamente ci si avvicina ai costi di un'attuazione di tipo brushless che è tipica dell'automazione.

7.1.2 Motore in corrente continua (standard)

I motori in corrente continua (o *DC motors*), ed in particolare quelli a magneti permanenti, trovano applicazione come attuatori nei servo sistemi grazie alla loro caratteristica di poter essere regolati in velocità in modo relativamente semplice ed economico. I motori a corrente continua possono essere suddivisi in due tipologie:

- *Motori a magneti permanenti*: lo statore viene realizzato con dei magneti
- *Motori ad eccitazione*: lo statore è ottenuto utilizzando degli avvolgimenti di filo conduttore intorno ad un materiale ad alta permeabilità magnetica; il campo magnetico viene indotto da una corrente circolante all'interno degli avvolgimenti

In entrambi i casi il rotore è avvolto da filo conduttore ed è immerso nel campo magnetico internamente allo statore. L'avvolgimento viene connesso con l'alimentazione esterna per mezzo di un commutatore, il quale inverte, due volte ad ogni giro, la direzione della corrente elettrica che percorre gli avvolgimenti. Il commutatore è costituito da un collettore a lamelle (collegate agli avvolgimenti del rotore) sulle quali strisciano delle spazzole (connesse all'alimentazione esterna).

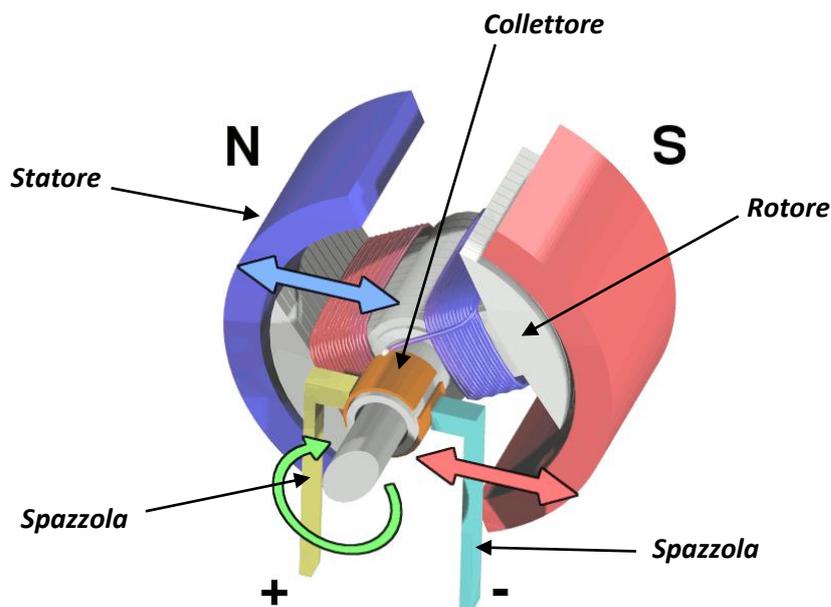


Figura 7.4: Motore a corrente continua (magnet permanenti)

Quando la corrente continua passa dalla spazzole all'avvolgimento del rotore si crea un campo magnetico che entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura (rotore). Nascono così delle forze di attrazione e repulsione tra il campo generato dal rotore e quello fisso imposto dalla statore. In questo modo il rotore si muove ed ogni mezzo giro il contatto strisciante inverte il verso della corrente permettendo la rotazione continua.

Le tensioni e le correnti che possono essere applicate ad un motore in corrente continua devono rimanere entro specifici limiti, che rappresentano i loro valori nominali o di targa, oltre i quali gli avvolgimenti del motore risulterebbero eccessivamente sollecitati per un corretto e prolungato funzionamento. Solo per brevi intervalli di tempo si ammettono correnti maggiori della nominale, sfruttando l'inerzia termica del rotore.

In *fig. 7.5* è rappresentata la curva caratteristica del motore a magneti permanenti.

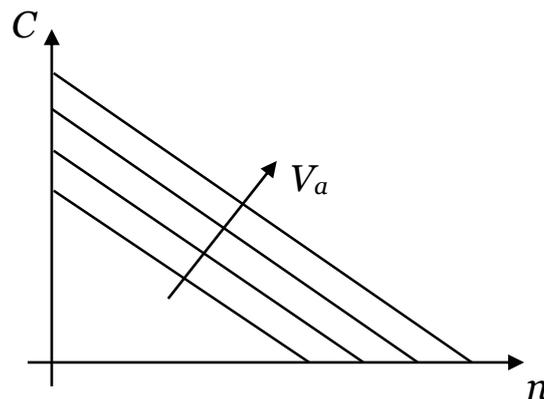


Figura 7.5: Curva caratteristica del motore a magneti permanenti

Grazie alla pendenza della curva, a seconda del carico applicato il motore accelera o decelera per bilanciare la coppia resistente. Modulando la tensione e la corrente di armatura, V_a e I_a rispettivamente, è possibile variare in modo semplice il punto di funzionamento del motore. La coppia è legata alla corrente di armatura da una costante di proporzionalità (diminuisce all'aumentare della temperatura); a regime vale:

$$V_a = RI_a + K_E \omega \quad (7.3)$$

$$C = K_T I_a = K_T \frac{V_a - K_E \omega}{R} \quad (7.4)$$

K_E = costante di forza controelettromotrice, K_T = costante di coppia, R = resistenza del circuito d'armatura, ω = velocità angolare.

Per quanto riguarda i motori ad eccitazione, essi si distinguono in:

- Macchina ad *eccitazione in parallelo*: statore e rotore sono collegati in parallelo;
- Macchina ad *eccitazione in serie*: statore e rotore sono collegati in serie;
- Macchina ad *eccitazione indipendente*: l'avvolgimento di statore è alimentato in maniera indipendente da quello di rotore.

Nel motore in corrente continua ad eccitazione in parallelo, gli avvolgimenti di campo e di armatura vengono alimentati da due distinti generatori. È quindi possibile comandare in modo indipendente la corrente che genera il campo di statore e la tensione e/o la corrente degli avvolgimenti di armatura. La curva caratteristica del motore ad eccitazione in parallelo (*fig. 7.6 a*) è la stessa del motore a magneti permanenti. In questo caso, oltre a poter cambiare la posizione della retta agendo sulla V_a , si può anche variarne l'inclinazione agendo sulla corrente di campo I_c (corrente di statore).

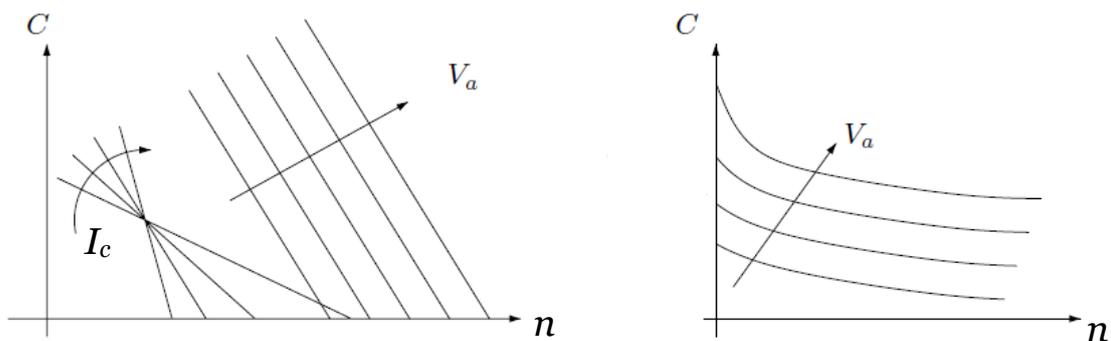


Figura 7.6: Curva caratteristica del motore (a) eccitazione in parallelo e indipendente e (b) eccitazione in serie

La seconda tipologia, motore ad eccitazione in serie, vede la stessa corrente I_a attraversare gli avvolgimenti di campo e di armatura. Come si può vedere da *fig. 7.6 b* questi motori possono raggiungere velocità elevate solo con carichi molto bassi.

Infine il motore ad eccitazione indipendente è la configurazione in cui si ha più flessibilità nel controllo dei parametri (coppia e velocità) della macchina. Qui l'alimentazione elettrica del circuito di eccitazione è distinta e separata da quella del circuito indotto. La curva caratteristica è rappresentata anche questa volta da una retta con pendenza negativa (fig. 7.6 a). L'area in cui può spaziare il punto di funzionamento a regime di un motore ad eccitazione indipendente si delimita imponendo dei limiti su:

- Corrente e tensione di armatura massime raggiungibili per non danneggiare il rotore;
- Corrente e tensione massime raggiungibili per non danneggiare lo statore, corrispondenti ad un flusso nominale che non deve essere superato.

Dalla definizione di questi limiti si ottiene la regione di funzionamento illustrata in fig. 7.7.

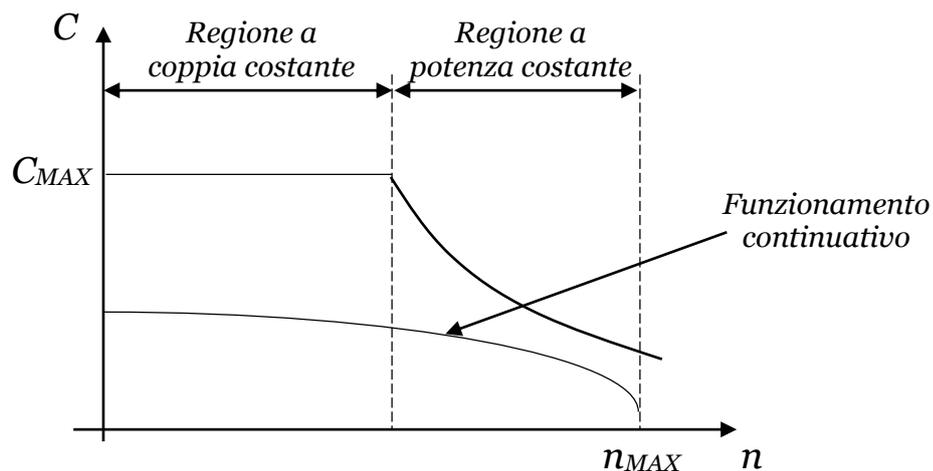


Figura 7.7: Regione di funzionamento del motore ad eccitazione indipendente

Nella regione a coppia costante, la velocità può essere regolata, a parità di coppia disponibile, agendo sulla tensione di armatura. Nella seconda regione, invece, per non eccedere la potenza massima, si regola la velocità agendo sull'intensità del flusso di eccitazione e quindi sulla corrente di campo.

A differenza del motore ad eccitazione, la macchina a magneti permanenti è più piccola, leggera ed efficiente grazie all'assenza dell'avvolgimento di statore; inoltre non c'è la necessità di realizzare un'alimentazione per il circuito di campo, riducendo quindi il surriscaldamento del motore. Queste caratteristiche sono particolarmente richieste per motori di piccola e media potenza. D'altra parte però, nella macchina ad eccitazione, l'avvolgimento di statore permette di

realizzare motori con potenze maggiori in quanto la coppia applicata all'albero motore può essere incrementata intensificando il campo magnetico prodotto dalla corrente circolante negli avvolgimenti.

Il grosso difetto dei motori a corrente continua in generale deriva dall'impegno di una commutazione di tipo meccanico. L'utilizzo del collettore accoppiato a spazzole striscianti comporta problemi di usura e scintillamento: le spazzole sono premute contro il collettore ma possono esserci delle condizioni per le quali avviene il distacco dalle lamelle che dà origine a scintille. Ripetute nel tempo queste scintille provocano bruciatura delle spazzole e usura progressiva del collettore. Altro difetto si riscontra nella perdita di efficienza a causa di dissipazione della potenza elettrica sottoforma di calore per effetto joule all'interno degli avvolgimenti e per attrito nel contatto strisciante collettore-spazzole. Inoltre c'è da dire che, a causa della configurazione compatta, il calore sviluppato è difficile da dissipare.

Nonostante questi svantaggi, il motore DC è interessante perché:

- Presenta una costante di proporzionalità fra coppia e corrente di armatura che permette una facile modulazione della coppia medesima regolando la corrente di armatura agendo sulla tensione di alimentazione;
- Il principio di funzionamento garantisce stabilità nella velocità di uscita;
- Questa tipologia di macchine elettriche può fornire coppie e velocità molto elevate.

7.1.3 Motore brushless

Si tratta di un motore a corrente continua senza spazzole nel quale si ha una commutazione elettronica anziché di tipo meccanico. Il rotore è a magneti permanenti e lo statore è formato da bobine poste radialmente (*fig. 7.8*).

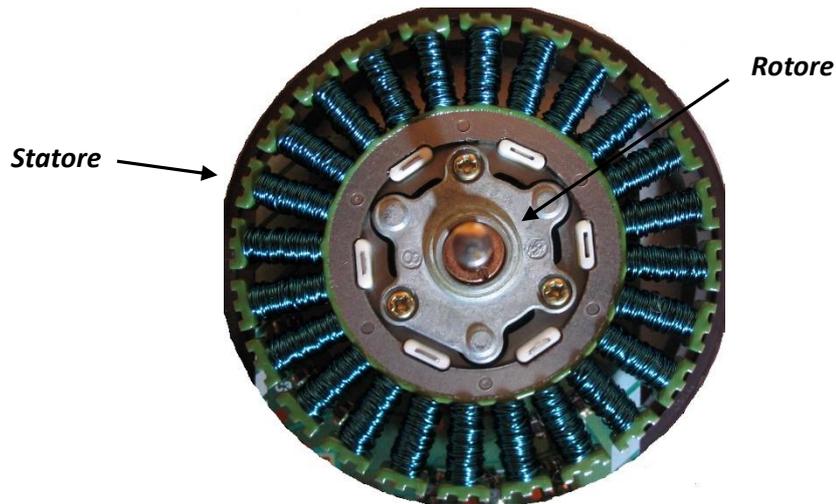


Figura 7.8: Motore Brushless

Un campo magnetico rotante è generato alimentando in successione le bobine mediante un dispositivo elettronico che inverte il senso o azzerla la corrente in ciascuna coppia di elettromagneti in base alla posizione angolare del rotore. Per poter avere la certezza di alimentare sempre le bobine giuste, sul rotore è montato un trasduttore di posizione che ne misura la posizione angolare esatta e manda l'informazione in retroazione.

Il campo di funzionamento è rappresentato in *fig. 7.9*.

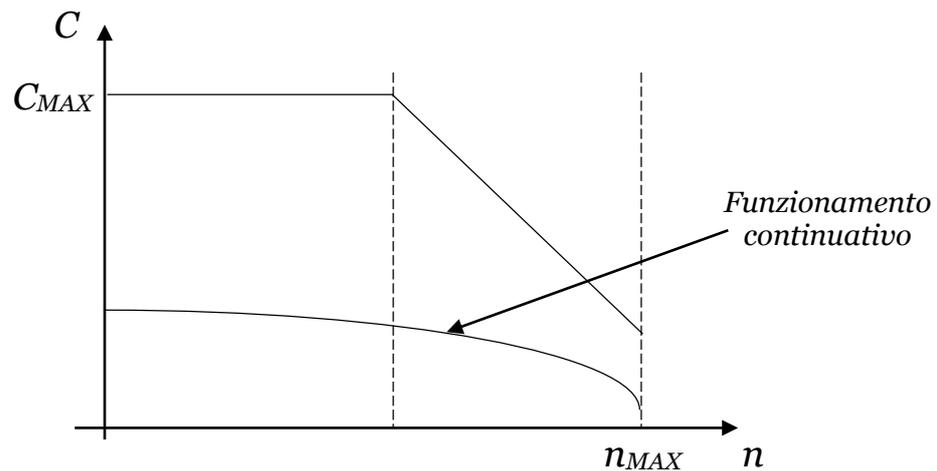


Figura 7.9: Regione di funzionamento del motore brushless

Il motore brushless è capace di erogare, in regime transitorio, una coppia di spunto che normalmente è almeno tre volte la coppia nominale; è quindi adatto per lavorare a velocità variabile.

Questa soluzione senza spazzole permette di eliminare completamente i problemi che si riscontravano con la commutazione meccanica: usura e scintillamento. Ciò consente:

- Notevole incremento dell'efficienza;
- Riduzione della manutenzione ed aumento della vita attesa del motore;
- Possibilità di poter far funzionare la macchina a regimi più elevati: in assenza degli attriti dovuti ai contatti striscianti si possono ottenere delle velocità che altrimenti non sarebbero raggiungibili a causa dell'eccessivo surriscaldamento.

Inoltre i magneti permanenti sono posizionati sul rotore e sono realizzati con speciali materiali che permettono di avere un'inerzia rotorica molto bassa, cosa che permette di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità che in accelerazione.

Sostanzialmente, l'unico svantaggio della macchina brushless sta nel maggiore costo dovuto a:

- Costo di una complessa logica di gestione della commutazione (driver);
- Costo del trasduttore di posizione;
- Magnet permanenti costosi.

7.1.4 Motore passo-passo

Il motore passo-passo (o step motor) è un motore sincrono in corrente continua senza spazzole che, insieme al driver di potenza che lo comanda, costituisce un azionamento a moto incrementale: ad ogni impulso di comando il motore compie una rotazione finita detta "passo". Il moto che si ottiene è controllato in posizione: noto il numero di impulsi inviati, risulta nota la posizione del rotore. La velocità dipende dalla frequenza con cui giungono gli impulsi di comando.

Sullo statore sono ricavate le espansioni polari attorno alle quali sono avvolte le spire del circuito di alimentazione; una fase di statore è composta da una coppia di espansioni polari diametralmente opposte. Il rotore invece presenta le coppie polari che interagiscono con il campo magnetico generato dallo statore.

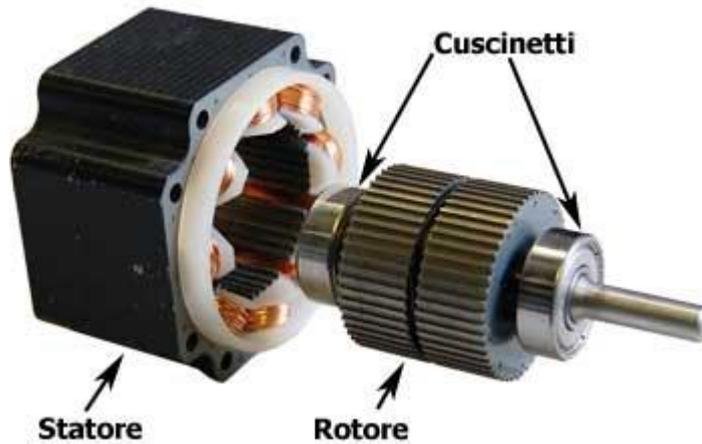


Figura 7.10: Motore passo-passo (ibrido)

Alimentando le fasi in successione mediante impulsi, le coppie polari tendono ad allinearsi con il campo magnetico generato originando così un movimento per *step*.

Si possono distinguere tre tipologie di motore passo-passo:

- *Motore a riluttanza variabile*: il rotore è un cilindro dentato realizzato in materiale ferromagnetico che si posiziona in modo da avere una coppia di denti (diametralmente opposti) allineata con la direzione di minima riluttanza magnetica a cui corrisponde una configurazione di equilibrio stabile.
- *Motore a magneti permanenti*: si ha un rotore costituito da un magnete permanente cilindrico che presenta sulla superficie un'alternanza di poli magnetici nord e sud. Il movimento avviene grazie alla tendenza di allineamento tra polarità opposte di statore e rotore.
- *Motore ibrido*: un magnete permanente, di forma cilindrica e magnetizzato assialmente, fa da nucleo a due ruote dentate di materiale ferromagnetico magnetizzate con poli opposti (una ruota polo N e l'altra polo S) e sfasate tra di loro di mezzo passo di dentatura. Anche i poli dello statore sono dentati. Quando una fase viene alimentata, essa attira a sé i denti del rotore per allinearli con i suoi.

La soluzione ibrida è quella più diffusa perché, combinando i principi della riluttanza variabile e dei magneti permanenti, fornisce le più alte prestazioni.

Il funzionamento del motore passo-passo avviene grazie all'inversione, ogni metà giro, del campo magnetico generato dalle fasi di statore. Questa inversione può avvenire in due modi, in base ai quali si distinguono:

- *Motori bipolari:* l'inversione del campo magnetico avviene invertendo il senso di circolazione della corrente che scorre nell'avvolgimento di fase.
- *Motori unipolari:* in questo caso ciascuna espansione polare presenta due avvolgimenti avvolti con versi opposti l'uno rispetto all'altro. L'inversione della polarizzazione viene realizzata passando dall'alimentazione di un avvolgimento all'altra.

L'eccitazione delle fasi determina il movimento del rotore ed esistono diverse modalità con le quali può avvenire. La più semplice è la *one-phase-on* e consiste nell'alimentare in successione separatamente ogni singola fase. In questo modo, ad ogni step il rotore si allinea con una specifica coppia polare. Facendo riferimento ad un motore a tre fasi, la successione di alimentazione può essere descritta con la seguente tabella, dove "1" indica che quella fase è in quel momento alimentata.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fase A	1			1			1		
Fase B		1			1			1	
Fase C			1			1			1

Tabella 7.1: Sequenza di comando *one-phase-on*

Esiste poi la tecnica di eccitazione *two-phase-on* che prevede l'alimentazione contemporanea di due fasi consecutive. In questo caso il rotore assume posizioni intermedie rispetto al caso precedente e si ha un sensibile incremento di coppia (di un fattore pari a $\sqrt{2}$).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fase A	1	1		1	1		1	1	
Fase B		1	1		1	1		1	1
Fase C	1		1	1		1	1		1

Tabella 7.2: Sequenza di comando two-phase-on

Le due modalità appena descritte generano un funzionamento *full step*, ovvero ad ogni comando il rotore gira di un passo intero. Combinando i modi a singola e doppia eccitazione, si ottiene un funzionamento a mezzo passo (*half step*).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fase A	1	1				1	1	1	
Fase B		1	1	1				1	1
Fase C				1	1	1			

Tabella 7.3: Sequenza di comando half step

Come si può notare dalla *tabella 7.3*, vi sono passi in cui è alimentata una sola fase e passi in cui ne sono alimentate due; ciò provoca un'irregolarità nella coppia. Il pregio di un funzionamento *half step* sta nel raddoppio della risoluzione angolare.

Le tecniche di eccitazione finora citate prevedono tutte una corrente di fase che ad ogni step può essere nulla oppure quella nominale (nell'uno o nell'altro verso). È però possibile (non per i motori a riluttanza variabile) trasferire gradualmente la corrente da un avvolgimento al successivo mediante modulazione della larghezza degli impulsi della tensione di alimentazione. Ciò consente di estendere il frazionamento del passo (in genere 4/8/16/32/64 micropassi) diminuendo gradualmente l'intensità della corrente in una delle due fasi e simultaneamente aumentandola gradualmente nell'altra fase. Questa tecnica è detta *microstepping* e comporta i seguenti vantaggi:

- Miglioramento della risoluzione angolare del motore;
- Restringimento del campo di frequenze di comando in cui il motore entra in risonanza;
- Riduzione dell'irregolarità di moto con conseguente riduzione anche della rumorosità.

Pilotando un azionamento passo-passo a frequenza di commutazione delle fasi f costante, si ottiene un funzionamento del motore a regime ad una velocità fissa corrispondente alla medesima frequenza f di pilotaggio. A questa velocità, la massima coppia resistente che il motore è in grado di vincere in condizioni di regime è detta *pull-out torque*. La curva di *pull-out* rappresenta l'andamento di questa coppia al variare della frequenza f (fig. 7.11) e definisce il campo di funzionamento in specifiche condizioni di alimentazione. Per frequenze di comando sufficientemente basse la coppia di pull-out assume un valore pari a circa la *holding torque* (coppia di tenuta) C_H che corrisponde a quella sopportabile del motore a velocità nulla senza perdere il passo. Per frequenze maggiori la coppia decresce progressivamente fino ad annullarsi a causa del sempre minor tempo che la corrente ha a disposizione per assestarsi al valore di regime, unitamente all'aumento della forza controelettromotrice (proporzionale alla velocità di rotazione del motore).

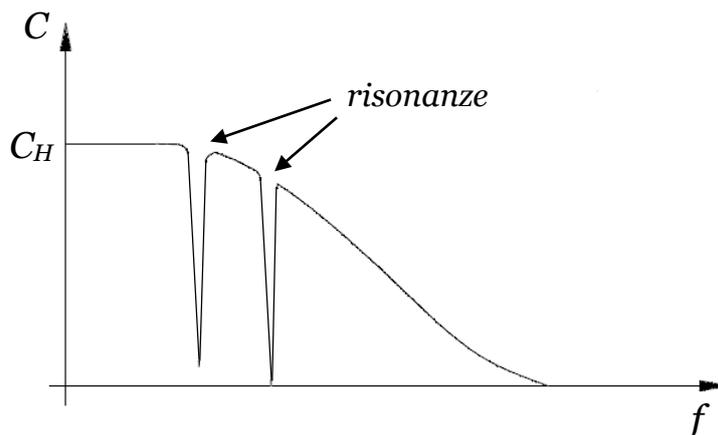


Figura 7.11: Curva di Pull-out

A causa del movimento per step, il moto è caratterizzato da vibrazioni dovute ad oscillazioni attorno alle posizioni di equilibrio. Quando la frequenza di alimentazione raggiunge frequenze simili a quelle di queste oscillazioni si ha un fenomeno di risonanza che comporta un calo drastico della coppia e la possibile perdita del passo. Il problema può essere superato, o ridotto, pilotando il motore con tecniche a passo frazionato.

Le caratteristiche peculiari del motore passo-passo sono:

- Possibilità di realizzare azionamenti di precisione controllati da computer in catena aperta, senza utilizzare sensori di posizione o di velocità, ricorrendo al conteggio dei passi;
- Elevata robustezza meccanica ed elettrica e lunga durata;
- Elevata rapidità e precisione di posizionamento;
- Alto rapporto coppia/inerzia;
- La velocità di rotazione può essere bassa anche senza l'uso di riduttori;
- È facile far compiere all'albero anche piccole rotazioni in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione;
- Ha generalmente un basso costo.

D'altro canto questa macchina presenta i seguenti difetti:

- Richiesta di circuiti elettronici per il pilotaggio;
- Perdita di passi sotto l'azione di sovraccarichi;
- Cali di coppia e possibile perdita di passo in presenza di risonanza;
- Massima velocità di rotazione che si aggira attorno ai 1000-1500 rpm.

In relazione alle loro eccezionali prestazioni, azionamenti passo-passo sono largamente usati per generare moti incrementali in applicazioni di piccola potenza che richiedono posizionamenti veloci e precisi, quali robotica, macchine a controllo numerico, stampanti, ecc.

7.2 Scelta del motore

Nell'exkursus del paragrafo precedente sono stati descritti in modo generale i vari servomotori elettrici che si possono prendere in considerazione per un'applicazione in campo automatico. A questo punto è ora di selezionare, fra quelle viste, la tipologia degli attuatori che verranno installati sul prototipo di questo progetto.

L'applicazione del caso specifico prevede il comando di due cavi, alle estremità dei quali è fissato un componente che si desidera percorra una certa

traiettoria. Il movimento avviene grazie all'allungamento, e/o accorciamento, combinato dei due fili. Si hanno le seguenti richieste:

- Discreta precisione di posizionamento: l'antenna deve riuscire a coprire l'area di lavoro senza lasciare zone d'ombra e senza sovrapporre troppo le passate di scansione;
- Buone prestazioni dinamiche: con la previsione che le velocità di lavoro saranno dettate dalle capacità di lettura dell'antenna, si punta comunque a garantire una certa capacità e flessibilità nel gestire movimenti repentini qualora la lettura RFID fosse mirata e non su tutta l'area;
- Ingombri ridotti;
- Costi contenuti.

A fronte di queste esigenze si scarta subito l'opzione asincrona perché poco adatta per le ampie variazioni di velocità e generalmente più ingombrante. Per quanto riguarda le altre tre macchine, tutte sono adatte per lavorare con velocità variabile e sono in grado di offrire buone prestazioni dinamiche. Generalmente il motore passo-passo è quello più economico mentre il brushless è invece quello più costoso. Il motore CC si trova a metà strada tra gli altri due da un punto di vista economico ma soffre di problemi di usura legati alle spazzole e, per questo motivo, garantisce una vita inferiore.

Al fine di minimizzare i costi e promuovere una soluzione "semplice", si è scelto di orientarsi sui motori passo-passo in quanto più economici e con la possibilità di un controllo in catena aperta senza retroazione. Inoltre lo step motor è in grado di lavorare a basse velocità anche senza riduttore.

CAPITOLO 8

OTTIMIZZAZIONE DEL MOTO

Scelta la configurazione del robot e scelti gli attuatori, è possibile calcolare la legge di moto ottimale compatibile con i limiti intrinseci del sistema. Dato un certo percorso desiderato, si identificheranno dei limiti cinematici oltre i quali si può incorrere in eccessivo rilassamento dei cavi, con conseguente perdita di controllo, o in tensioni e coppie non sostenibili da cavi e motori. Una volta stabiliti tali limiti sarà allora possibile imporre il minor tempo di percorrenza compatibile.

8.1 Vincoli sull'accelerazione dell'end-effector

Come già detto più volte, è importante assicurarsi che non vi siano condizioni di eccessivo rilassamento dei cavi altrimenti si perde il pieno controllo della posizione dell'elemento terminale. D'altra parte occorre anche verificare che non si raggiungano mai degli stati di tensione troppo elevati per non incorrere nel cedimento dei cavi. Nei capitoli 5 e 6 si è visto che esistono delle zone del piano di lavoro in cui il carico statico risulta più critico. Presupponendo di avere area di lavoro e massa dell'end-effector tali da non compromettere la resistenza (in condizioni statiche) dei cavi, in [5] e in [7] viene proposto un metodo per garantire il corretto funzionamento della macchina anche in condizioni dinamiche rispettando dei vincoli cinematici. I limiti di tensione ammissibile nei cavi vengono tradotti in limiti cinematici definendo dei range di velocità ed accelerazione all'interno dei quali si possono scegliere delle leggi di moto che soddisfano a priori le condizioni desiderate di tensione.

Sostituendo l'espressione (4.9) del vettore risultante delle tensioni nei cavi nell'equazione (4.8) dell'equilibrio dell'elemento terminale, si ricava:

$$\mathbf{F}_{ext} + \mathbf{S}\mathbf{T} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} \quad (8.1)$$

Dalla (8.1) si può isolare il vettore delle tensioni:

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}^{-1}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{F}_{ext}) \quad (8.2)$$

Per garantire tensioni nei cavi limitate e non troppo basse, T_i ($i = 1,2$) deve essere compreso tra una tensione minima T_{MIN} e una tensione massima T_{MAX} :

$$\mathbf{T}_{MIN} \leq \mathbf{S}^{-1}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{F}_{ext}) \leq \mathbf{T}_{MAX} \quad (8.3)$$

La (8.3) può essere riscritta come:

$$\mathbf{T}_{MIN} \leq \mathbf{Z}\ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{D} \leq \mathbf{T}_{MAX} \quad (8.4)$$

dove $\mathbf{Z} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{M}$ e $\mathbf{D} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{F}_{ext}$. La (8.4) può anche essere scritta, per il caso in esame, nella seguente forma:

$$\begin{cases} T_{MIN} \leq z_{11}\ddot{x} + z_{12}\ddot{y} - d_1 \leq T_{MAX} \\ T_{MIN} \leq z_{21}\ddot{x} + z_{22}\ddot{y} - d_2 \leq T_{MAX} \end{cases} \quad (8.5)$$

avendo definito:

$$\mathbf{Z} := \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} := \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix}$$

Infine si esprimono le componenti cartesiane dell'accelerazione dell'end-effector in termini di accelerazione tangenziale e centripeta:

$$\ddot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} a \cos \alpha - \frac{v^2}{\gamma} \sin \alpha \\ a \sin \alpha + \frac{v^2}{\gamma} \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (8.6)$$

dove a e γ sono rispettivamente il modulo dell'accelerazione tangenziale ed il raggio di curvatura della traiettoria. La (8.5) diviene quindi:

$$\begin{cases} T_{MIN} \leq a[z_{11} \cos \alpha + z_{12} \sin \alpha] + \frac{v^2}{\gamma} [-z_{11} \sin \alpha + z_{12} \cos \alpha] - d_1 \leq T_{MAX} \\ T_{MIN} \leq a[z_{21} \cos \alpha + z_{22} \sin \alpha] + \frac{v^2}{\gamma} [-z_{21} \sin \alpha + z_{22} \cos \alpha] - d_2 \leq T_{MAX} \end{cases} \quad (8.7)$$

che può essere riscritta:

$$\begin{cases} T_{MIN} \leq ap_1 + \frac{v^2}{\gamma} q_1 - d_1 \leq T_{MAX} \\ T_{MIN} \leq ap_2 + \frac{v^2}{\gamma} q_2 - d_2 \leq T_{MAX} \end{cases} \quad (8.8)$$

dove:

$$\begin{aligned} p_1 &= [z_{11} \cos \alpha + z_{12} \sin \alpha]; & p_2 &= [z_{21} \cos \alpha + z_{22} \sin \alpha] \\ q_1 &= [-z_{11} \sin \alpha + z_{12} \cos \alpha]; & q_2 &= [-z_{21} \sin \alpha + z_{22} \cos \alpha] \end{aligned}$$

Si considera ora i due problemi separatamente; i vincoli da rispettare per non avere eccessivo rilassamento dei cavi sono:

$$\begin{cases} p_1 a \geq T_{MIN} - \frac{v^2}{\gamma} q_1 + d_1 \\ p_2 a \geq T_{MIN} - \frac{v^2}{\gamma} q_2 + d_2 \end{cases} \quad (8.9)$$

mentre i vincoli che definiscono il limite massimo per non danneggiare i cavi sono:

$$\begin{cases} p_1 a \leq T_{MAX} - \frac{v^2}{\gamma} q_1 + d_1 \\ p_2 a \leq T_{MAX} - \frac{v^2}{\gamma} q_2 + d_2 \end{cases} \quad (8.10)$$

La (8.9) e la (8.10) valgono per qualsiasi traiettoria.

Nel caso di percorso rettilineo α rimane costante, di conseguenza rimangono costanti anche i termini p_i e q_i , ed il raggio di curvatura γ va all'infinito e conseguentemente v^2/γ si annulla. Perciò si ha:

$$\begin{cases} p_1 a \geq T_{MIN} + d_1 \\ p_2 a \geq T_{MIN} + d_2 \end{cases} ; \begin{cases} p_1 a \leq T_{MAX} + d_1 \\ p_2 a \leq T_{MAX} + d_2 \end{cases} \quad (8.11)$$

Si può osservare che gli elementi d_i sono sempre negativi. Infatti il vettore \mathbf{D} equivale all'opposto del vettore che raccoglie le componenti delle tensioni nei cavi in condizioni statiche e si sa che queste sono sempre positive all'interno dell'area rettangolare in cui si muove l'elemento terminale. Per risolvere i due sistemi di (8.11) bisogna valutare di caso in caso il segno degli elementi p_i :

Caso 1: $p_1, p_2 > 0$

$$\begin{cases} a \geq \frac{T_{MIN} + d_1}{p_1} \\ a \geq \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2} \end{cases} ; \begin{cases} a \leq \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1} \\ a \leq \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2} \end{cases}$$

Intersecando per ciascun sistema le soluzioni delle due disequazioni, si ricava:

$$a_{MIN} = \max\left(\frac{T_{MIN} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2}\right)$$

$$a_{MAX} = \min\left(\frac{T_{MAX} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2}\right)$$

Caso 2: $p_1, p_2 < 0$

$$\begin{cases} a \leq \frac{T_{MIN} + d_1}{p_1} \\ a \leq \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2} \end{cases} ; \begin{cases} a \geq \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1} \\ a \geq \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2} \end{cases}$$

$$a_{MIN} = \max\left(\frac{T_{MAX} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2}\right)$$

$$a_{MAX} = \min\left(\frac{T_{MIN} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2}\right)$$

Caso 3: $p_1 > 0, p_2 < 0$

$$\begin{cases} a \geq \frac{T_{MIN} + d_1}{p_1} \\ a \leq \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2} \end{cases} ; \begin{cases} a \leq \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1} \\ a \geq \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2} \end{cases}$$

$$a_{MIN} = \max\left(\frac{T_{MIN} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2}\right)$$

$$a_{MAX} = \min\left(\frac{T_{MIN} + d_2}{p_2}, \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1}\right)$$

Caso 4: $p_1 < 0, p_2 > 0$

$$\begin{cases} a \leq \frac{T_{MIN} + d_1}{p_1} \\ a \geq \frac{T_{MIN} + d_2}{p_2} \end{cases} ; \begin{cases} a \geq \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1} \\ a \leq \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2} \end{cases}$$

$$a_{MIN} = \max\left(\frac{T_{MIN} + d_2}{p_2}, \frac{T_{MAX} + d_1}{p_1}\right)$$

$$a_{MAX} = \min\left(\frac{T_{MIN} + d_1}{p_1}, \frac{T_{MAX} + d_2}{p_2}\right)$$

Poiché i parametri p_i e d_i dipendono dalla posizione e dalla traiettoria dell'elemento terminale, il calcolo appena illustrato deve avvenire punto per punto lungo il percorso stabilito, si utilizza quindi un software di calcolo e si ricava una fascia di accelerazioni ammissibili.

Se la legge di moto scelta presenta accelerazioni che in ogni punto del percorso rispettano i limiti di accelerazione minima e massima calcolati con la procedura appena esposta, allora i limiti di tensione nei cavi sono a priori rispettati.

8.2 Tempo minimo di percorrenza

Una volta definiti i limiti di accelerazione lungo un desiderato percorso si può, tra le possibili leggi di moto compatibili con i vincoli, selezionare quella che presenta il minor tempo di percorrenza. Nel capitolo 5 è stata definita come traiettoria una successione di tratti rettilinei, per ciascuno dei quali è stata imposta una legge di moto polinomiale di quinto grado. Per ognuna delle corse rettilinee è quindi possibile individuare la legge polinomiale di grado cinque, con legge di accelerazione compresa fra i limiti ammissibili, che prevede la percorrenza più rapida. Convienne anche considerare un limite sulla massima velocità raggiungibile v_{MAX} che, negli sviluppi futuri, sarà dettato dalla massima velocità alla quale il dispositivo RFID sarà in grado di percepire ed identificare tutti i tag davanti a sé.

Data l'estensione S_f di un generico tratto, la massima velocità \dot{s}_{MAX} e la massima accelerazione \ddot{s}_{MAX} , che si raggiungono con una legge di moto polinomiale di quinto grado, sono esprimibili in funzione del tempo di percorrenza T_f :

$$\dot{s}_{MAX} = \frac{15S_f}{8T_f} \quad (8.12)$$

$$\ddot{s}_{MAX} = \frac{10S_f}{T_f^2\sqrt{3}} \quad (8.13)$$

Si impone \dot{s}_{MAX} coincidente con la velocità limite v_{MAX} e \ddot{s}_{MAX} equivalente all'accelerazione massima a_{MAX} della legge di moto con curva di accelerazione tangente internamente ai limiti della fascia di accelerazioni ammissibili. In questo modo, dalla (8.12) e dalla (8.13) si possono ricavare due tempi di percorrenza, il massimo dei quali sarà quello che caratterizza la legge polinomiale ammissibile, per quel tratto di percorso, con il minor tempo T_{fMIN} :

$$T_{fMIN} = \max\left(\frac{15S_f}{8v_{MAX}}, \sqrt{\frac{10S_f}{a_{MAX}\sqrt{3}}}\right) \quad (8.14)$$

8.3 Verifica di coppia dei motori

La legge di moto ricavata con le modalità descritte nei due paragrafi precedenti è caratterizzata dal minor tempo di percorrenza possibile compatibilmente con il range di tensioni accettabili nei cavi. Tale legge non è a priori realizzabile se non si vanno a valutare le coppie richieste ai motori e si verifica che esse siano effettivamente erogabili. È dunque necessario, dopo aver scelto gli attuatori, verificare che in ogni istante del moto non si esca dal campo di funzionamento delimitato da una curva coppia-giri motore.

Per questo lavoro è stato implementato uno script che calcola, per ogni punto del percorso, limiti superiore ed inferiore di accelerazione e si ricava infine la legge di moto con il minor tempo di percorrenza. Si riprendono, per i calcoli che seguono, le dimensioni ed i valori dei parametri geometrici utilizzati nei capitoli 4 e 5 per studiare la configurazione di riferimento del pannello $H \times L = 3m \times 2m$; in *figura 8.1* è illustrata la fascia di accelerazioni ammissibili.

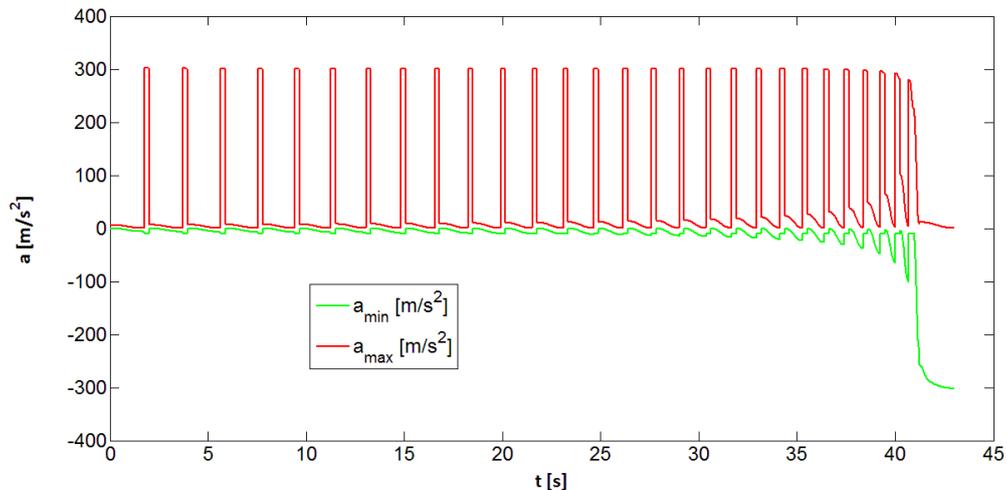


Figura 8.1: Fascia di accelerazioni ammissibili

Come si vedrà nel capitolo successivo, lo step motor scelto per l'attuazione del prototipo è un codice dell'*Orientalmotor* in grado di erogare una *holding torque* pari a circa $1,2 Nm$ ed è caratterizzato dalla seguente curva di *pull-out torque*:

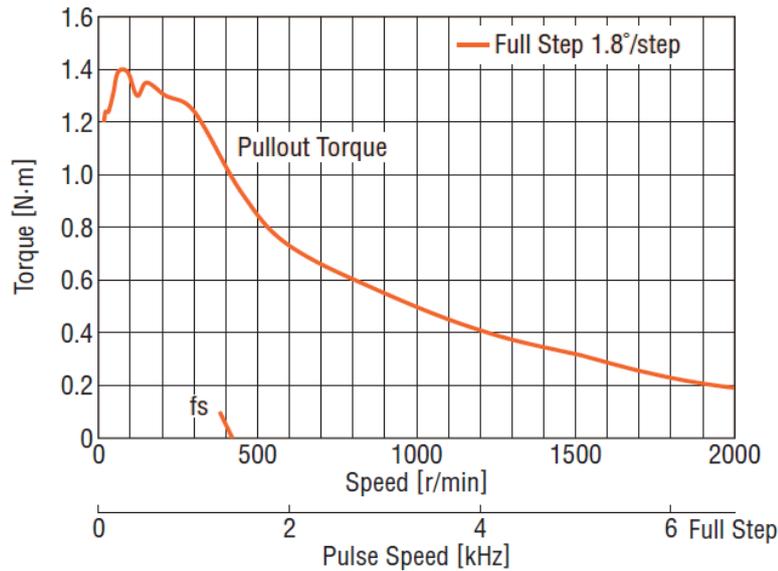


Figura 8.2: Pull-out Torque del motore scelto

Questa curva è facilmente inseribile nello script di calcolo (ad esempio può essere approssimata per segmenti) per imporre un controllo di coppia, in corrispondenza di ciascun punto del percorso, immediatamente a valle del calcolo del minimo tempo di percorrenza T_{fMIN} di ogni tratto rettilineo del percorso.

Qualora risultasse che ad un certo istante la coppia richiesta ad uno dei due motori ecceda la curva di *pull-out* (o una sua frazione), si interrompe la prosecuzione dello script, si aumenta di un Δt (es. $0.01s$) il tempo T_{fMIN} e si ricalcolano legge di moto e coppie motore. Aumentando il tempo di percorrenza calano le accelerazioni e di conseguenza calano anche le coppie poiché l'inerzia

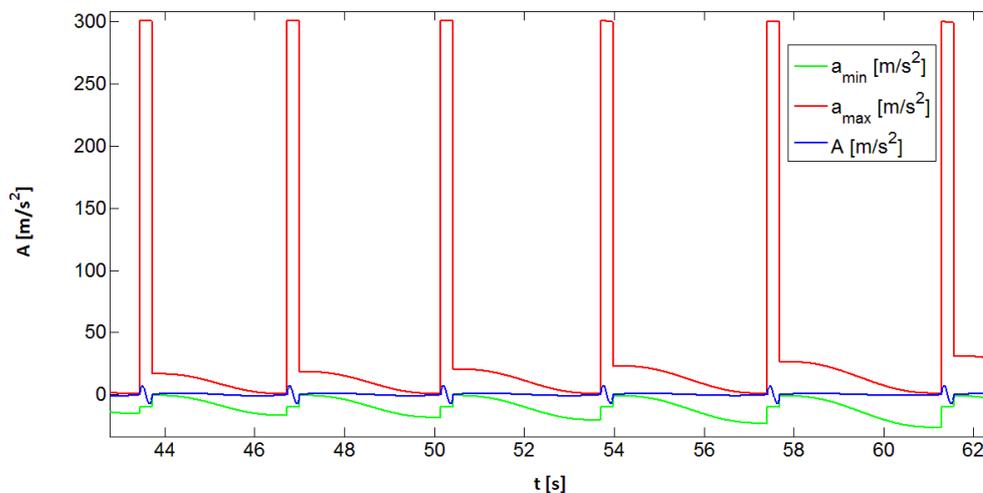


Figura 8.3: Accelerazione dell'end-effector

da vincere è minore. Questo procedimento va ripetuto iterativamente finché il controllo di coppia non risulta ovunque soddisfatto. In *fig. 8.3* è mostrata una porzione dell'andamento dell'accelerazione, compresa tra i limiti imposti e conseguente al controllo di coppia. La curva di velocità è riportata in *fig. 8.4*; si nota che nella parte bassa del piano l'elemento terminale si sposta molto più rapidamente e mano a mano che sale effettua corse sempre più rilassate. Ciò si spiega con il fatto che per l'aumento del carico si è costretti a ridurre le accelerazioni per richiedere meno coppia ai motori e rispettare quindi la curva di *pull-out*.

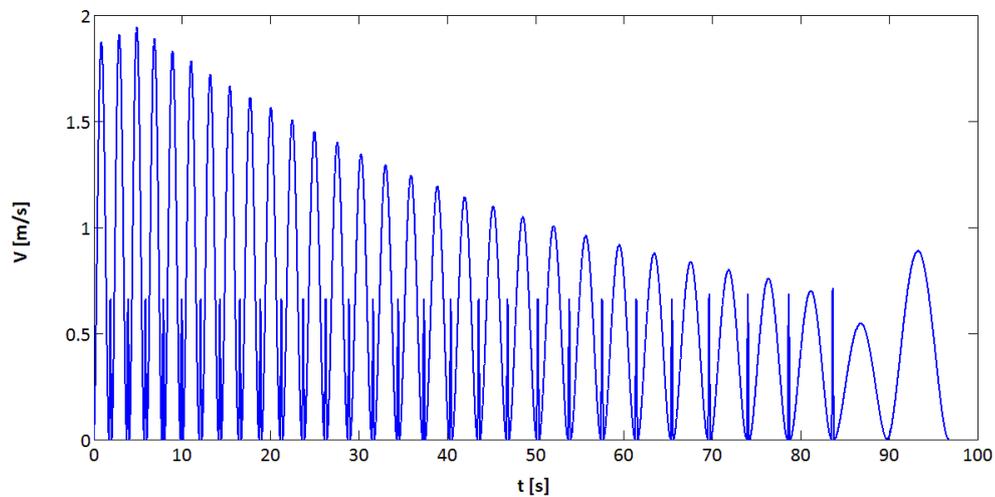


Figura 8.4: Andamento della velocità lungo il percorso dell'end-effector

Tensioni e coppie, relative al cavo e motore 2 rispettivamente, sono riportate nelle *fig. 8.5* e *8.6*. Per cavo e motore 1 i grafici sono analoghi.

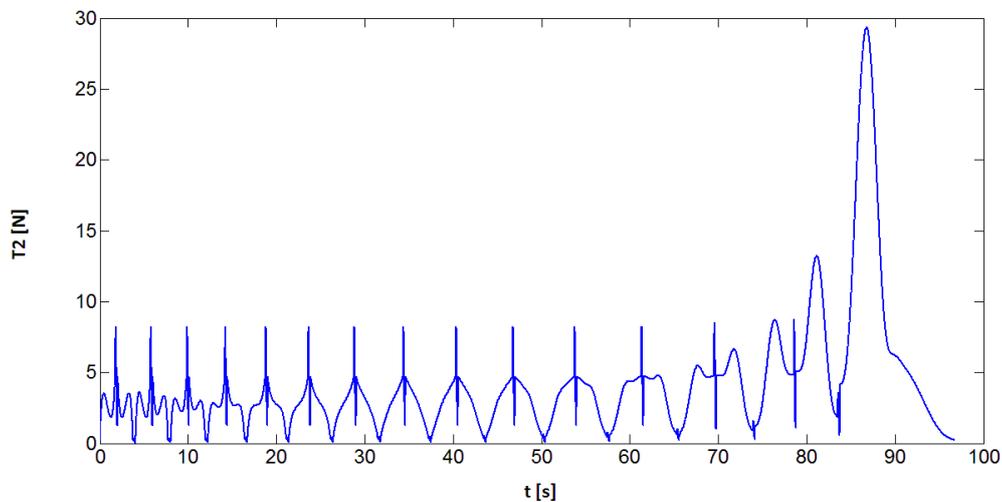


Figura 8.5: Tensione nel cavo 2

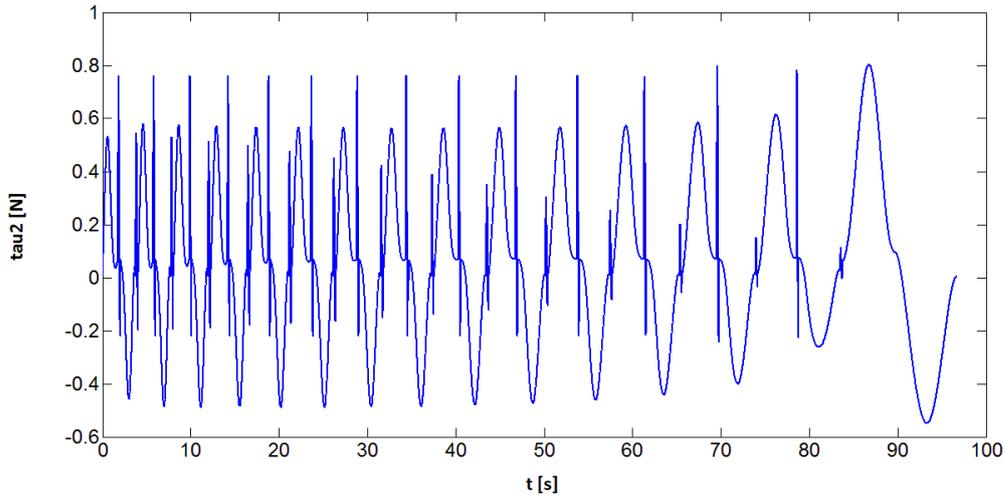


Figura 8.6: Coppia richiesta al motore 2

Si noti come la τ_{2} non superi mai la curva di *pull-out*, grazie al controllo effettuato (è stato imposto di stare sotto la curva di almeno un 20%); ciò si può vedere in modo più immediato osservando *fig. 8.7* in cui si fa il confronto fra i punti di funzionamento (in valore assoluto) e la *pull-out torque*.

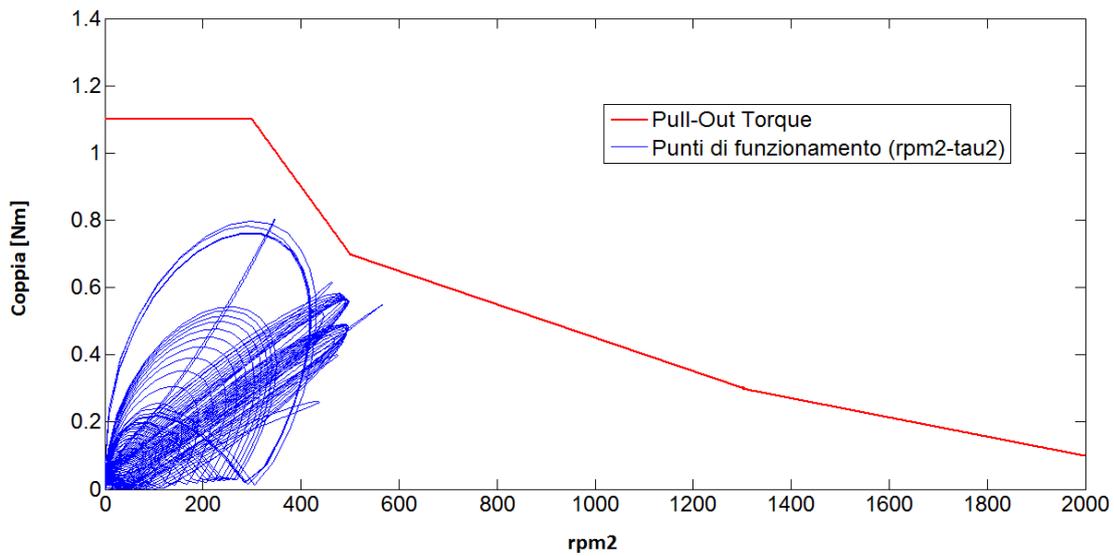


Figura 8.7: Campo di funzionamento

CAPITOLO 9

DIMENSIONAMENTO DEI COMPONENTI ED ASSEMBLAGGIO DEL PROTOTIPO

Il fine principale di questo prototipo è realizzare il movimento del robot per verificare se il percorso desiderato viene effettivamente rispettato entro scostamenti accettabili. L'altro aspetto importante consiste nel conseguire, con l'azienda ospitante, un'esperienza relativamente ai motori passo-passo e ad un'elettronica di controllo più evoluta rispetto a quella usualmente impiegata.

In questo capitolo si percorrono i passaggi che portano alla realizzazione di un pannello $H \times L = 1,5 \times 2 \text{ m}$; verranno descritti singolarmente i vari componenti: quelli disegnati con il software di modellazione grafica *SolidWorks 2014* e quelli semplicemente acquistati, necessari per l'assemblaggio finale.

9.1 Schema generale della macchina

Il modulo che si sta realizzando ha la conformazione di un pannello di spessore contenuto ospitante un robot parallelo cavo guidato. Poiché lo scopo del prototipo è puramente di tipo funzionale, non ci si preoccupa in questo contesto di ottimizzare aspetti quali: scelta dei materiali, posizione e configurazione del quadro elettrico, dimensioni di ingombro, ecc. In questa fase si individuano e si realizzano (o acquistano) solamente i componenti essenziali.

Innanzitutto si può distinguere una parte meccanica, cioè quella che effettivamente si sta progettando, e una parte elettronica, che verrà acquistata. Dal lato meccanico si possono intuitivamente individuare i seguenti sottoassiemi:

1. Telaio
2. Copertura
3. Gruppi motore-rocchetto
4. Gruppo antenna-porta antenna (end-effector)
5. Sistema passa-cavi

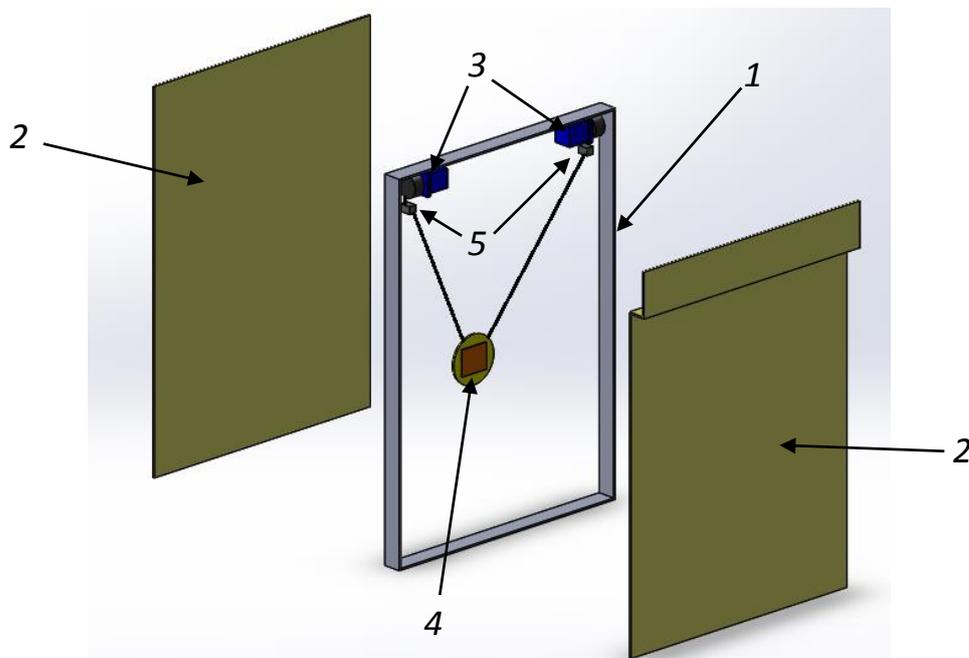


Figura 9.1: Schema della parte meccanica

Vi sono poi componenti a sé stanti come: cavi, sensori per lo zero macchina, flange di supporto per il fissaggio dei motori e la minuteria.

Dal lato elettronico si dovranno acquistare:

- *Drivers di potenza* (o convertitori statici): ad essi sono direttamente collegati i motori ed, in base ai segnali di comando, provvedono alla loro corretta alimentazione.
- *Unità di controllo* (microprocessore): definisce le modalità di funzionamento del sistema convertendo le informazioni per il movimento in comandi logici temporizzati da inviare in entrata ai drivers.

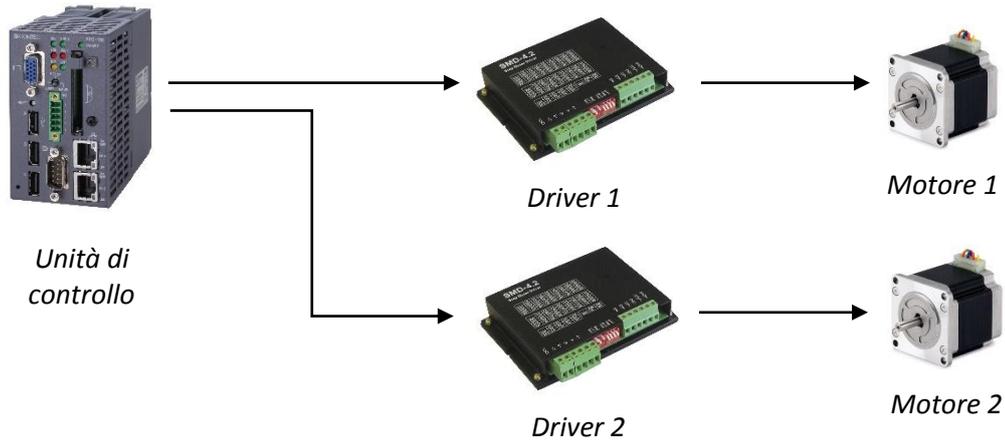


Figura 9.2: Schema della parte elettronica

9.2 Gruppo porta antenna

L'elemento terminale del robot a cavi è costituito da un sub-assemblato al quale viene fissato il *reader RFID*. Questo end-effector deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Presenza di un perno, in corrispondenza del centro di massa, sul quale si possano agganciare le estremità dei due cavi;
- Zona di fissaggio della scheda RFID;
- Ingombro trasversale non troppo superiore a quello della sola antenna;
- Basso coefficiente di attrito a contatto con le pareti di copertura;
- Peso sufficiente per non risentire troppo dell'influenza del cavo di alimentazione appeso alla scheda, ma non tale da caricare eccessivamente i cavi nelle zone critiche dell'area di lavoro;
- Non deve essere permessa la rotazione completa attorno al perno di aggancio, altrimenti causa di un eccessivo attorcigliamento del cavo RFID.

Tenendo a mente queste direttive e dimensionando il porta antenna sulla base di un *reader* di prova presente in casa (*fig. 9.3*), è stata ideata la soluzione illustrata in *fig. 9.4* e *9.5*.

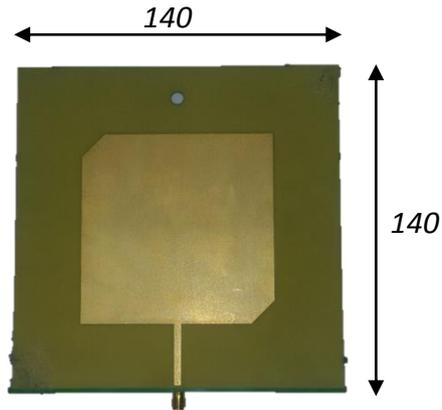


Figura 9.3: Antenna RFID

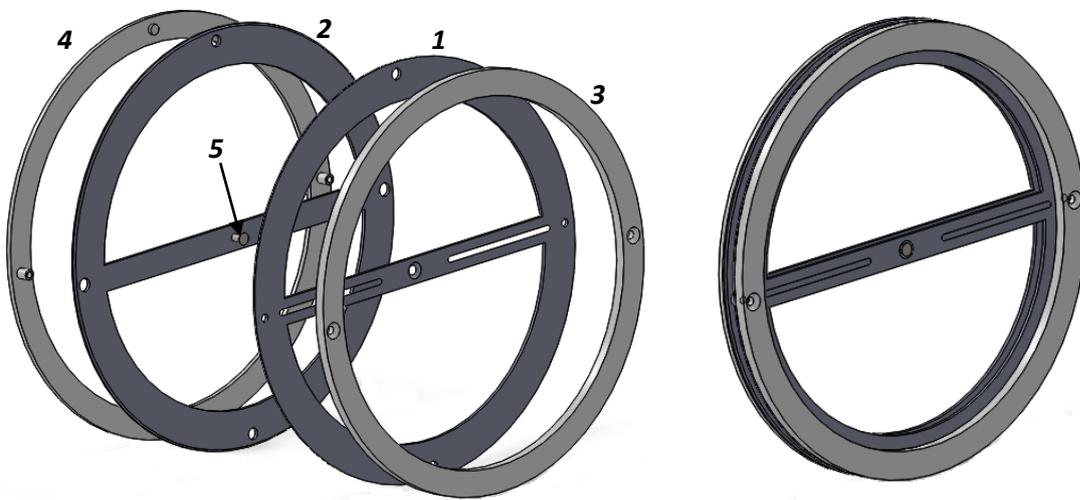


Figura 9.4: Sub-assemblato porta-antenna; a) vista esplosa e b) porta-antenna assemblato

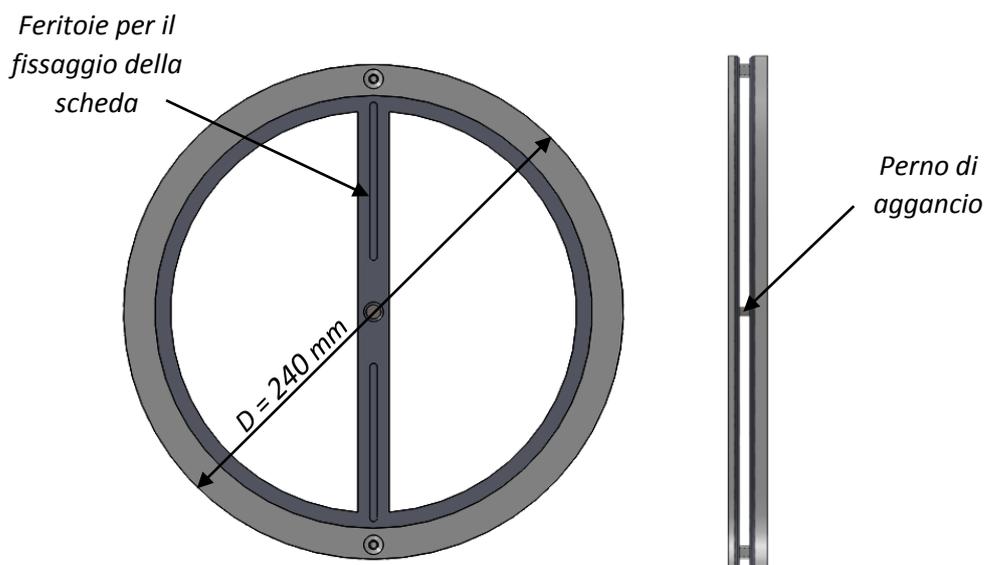


Figura 9.5: Porta antenna a) vista frontale e b) vista laterale

Sono stati previsti cinque componenti (*fig.9.4*):

1. *Anello anteriore porta-scheda*: componente in lamiera (2mm, acciaio zincato) sul quale sono ricavate delle feritoie per fissare antenne di prova di varie dimensioni.
2. *Anello posteriore*: componente in lamiera (2mm, acciaio zincato) il cui unico scopo è quello di bilanciare la controparte anteriore.
3. *Anello anteriore a basso attrito*: è un anello pensato per evitare il contatto tra antenna e pannello di copertura e realizzato in materiale plastico per ridurre i fenomeni di attrito.
4. *Anello posteriore a basso attrito*: anch'esso realizzato in materiale plastico per ridurre l'attrito fra la parte posteriore del porta scheda ed il pannello di copertura posteriore. Presenta due perni filettati per fissare tra di loro le due metà dell'organo porta antenna. Questi perni servono anche per ostacolare la rotazione, attorno al perno di aggancio, dell'intero sub-assemblato. Infatti, se durante il moto viene indotta una rotazione dell'elemento terminale, i due perni prima o poi vengono a contatto con uno dei due cavi arrestando la rotazione medesima.
5. *Perno di aggancio*: realizzato mediante un rivelo (inserto filettato) forzato attraverso un opportuno foro ricavato su una delle due lamiere; una vite viene poi avvitata per fermare l'altra lamiera.

Si è scelto di impiegare due componenti in lamiera per conferire un certo peso in grado di contrastare l'inerzia e l'oscillazione del cavo dell'antenna. Sebbene questi due anelli si trovino dietro alla scheda RFID, essi potrebbero causare problemi di interferenza durante le letture. Per questo motivo è stata realizzata una seconda versione del porta-antenna, analoga alla prima ma formata da soli due componenti in materiale plastico (*fig. 9.6*). In questo modo, le prove sul prototipo potranno essere fatte valutando differenze di peso e di materiale del porta-antenna.

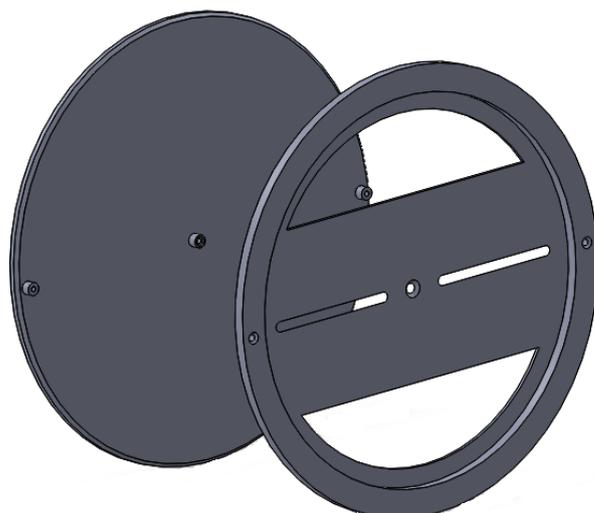


Figura 9.6: End-effector in materiale plastico

9.3 Telaio

I componenti che costituiscono il telaio della macchina hanno la funzione di conferire rigidità all'intera struttura fornendo il supporto al quale fissare tutti gli altri componenti del modulo. Grazie al robot a cavi, lo spazio di lavoro coincide con una finestra rettangolare di spessore dipendente dall'ingombro del sottosistema antenna-porta antenna. Il telaio può quindi essere costituito da quattro elementi che definiscono il perimetro di tale "finestra". Di questi quattro, il componente orizzontale superiore sarà quello al quale si fisseranno i motori e, per scelta, anche quello sul quale si posizioneranno i passa-cavi in modo da avere un unico elemento di supporto per i componenti interni alla macchina. I tre rimanenti lati del telaio conferiranno la rigidità necessaria per mantenere intatto il piano di lavoro e supporteranno i pannelli di copertura.

Per questo primo prototipo, gli elementi del telaio saranno realizzati a partire da lamiere (spessore di 2mm) in acciaio zincato tagliate, piegate e forate. Il modello disegnato al CAD è riportato in *fig. 9.7*.

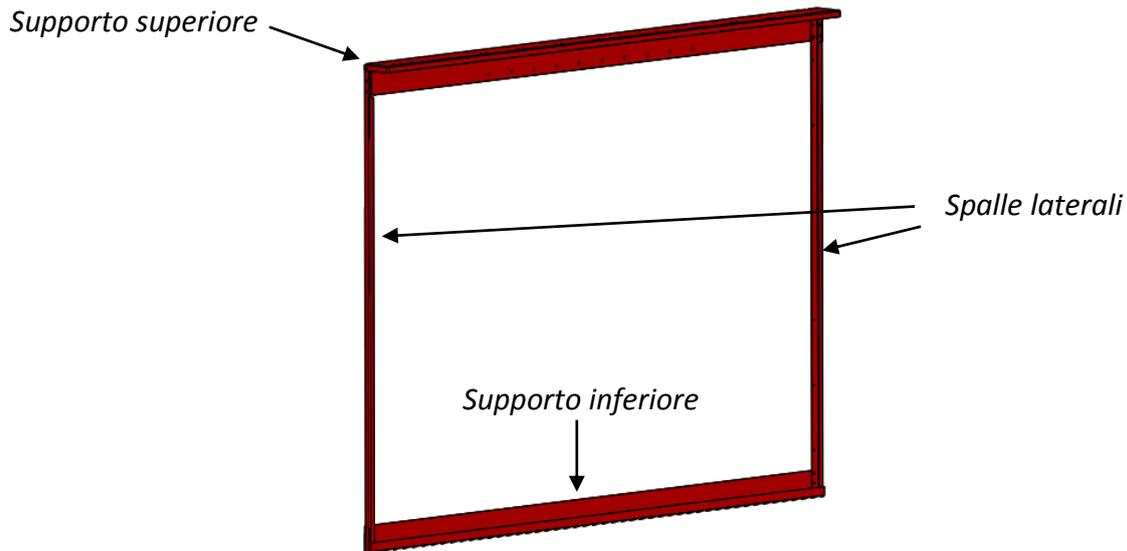


Figura 9.7: Telaio HxL = 1,5x2 m

Poiché lo scopo principale del prototipo è quello di verificare il corretto rispetto delle traiettorie dell'end-effector, le dimensioni di ingombro imposte al telaio sono tali da poter valutare delle corse sufficientemente lunghe senza costruire una struttura troppo ingombrante. Lo spessore del pannello dipende invece dall'ingombro dell'elemento porta antenna che deve esservi internamente ospitato.

9.4 Scelta del motore passo-passo e dimensionamento dei rocchetti per l'avvolgimento dei cavi

Scegliere il motore da acquistare significa individuare quello che permette di ottenere le leggi di moto desiderate fornendo le coppie e velocità necessarie, operando un giusto dimensionamento per sfruttare in modo adeguato le prestazioni dell'attuatore. Nel caso specifico in esame si pone anche l'attenzione sull'ingombro, che deve essere contenuto; quindi la taglia, espressa in termini di dimensione della flangia di fissaggio, va possibilmente mantenuta bassa.

Date le dimensioni del piano di lavoro, la massima coppia richiesta ai motori è in gran parte determinata dalla massima tensione statica raggiunta nei cavi alla quale si aggiungono una componente inerziale ed una componente viscosa che si

possono ridurre sensibilmente rilassando velocità ed accelerazioni. In particolare, la massima tensione statica dipende da quanto i due cavi si avvicinano all'allineamento. In *fig. 9.8* è riportato il campo di tensione statica nel cavo 1 per una superficie di lavoro pari a $1,5 \times 2 \text{ m}^2$ con elemento terminale di massa $m = 0,5 \text{ kg}$.

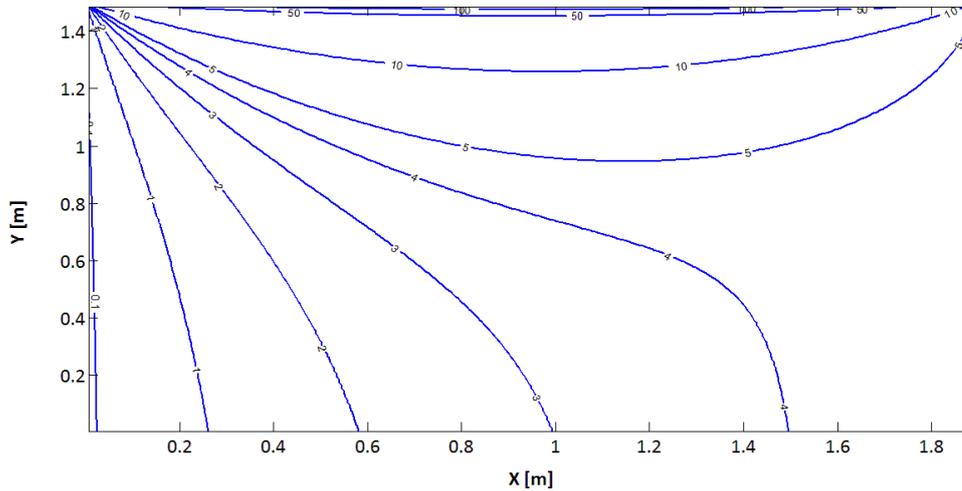


Figura 9.8: Tensione nel cavo 1 in condizioni statiche

Si osserva che, rimanendo a qualche *cm* di distanza dal bordo superiore del piano, corrispondente all'altezza dei passa-cavi, non si superano mai i 50 N di tensione statica. Questo vale indipendentemente dal valore della dimensione H . Tenendo come riferimento di massima tensione statica i 50 N , la massima coppia statica da garantire dipenderà dal raggio del rocchetto di avvolgimento.

La progettazione dei rocchetti si basa sostanzialmente sulla scelta del diametro Φ_r della parte cilindrica attorno alla quale si avvolge il cavo. Infatti il diametro di base del rocchetto ha influenza su diversi fattori. Innanzitutto la velocità di rotazione richiesta al motore è inversamente proporzionale al raggio di rotazione:

$$\dot{\beta} = \frac{V_{tan}}{r} \quad (9.1)$$

dove r è il raggio del rocchetto, pari a metà del diametro, e V_{tan} è la velocità tangenziale coincidente con la velocità di avvolgimento/svolgimento del cavo. Di conseguenza, a parità di velocità tangenziale, maggiore è il diametro e minori saranno le velocità di rotazione e viceversa. Un altro parametro direttamente legato a Φ_r è la coppia richiesta all'attuatore. È evidente che, a parità di tensione

nel cavo T , all'aumentare del diametro aumenta proporzionalmente anche la coppia C da erogare:

$$C = rT \quad (9.2)$$

Questi due fenomeni vanno considerati in parallelo tenendo presente la tipica curva di pull-out dei motori passo-passo caratterizzata da una progressiva diminuzione della coppia all'aumentare del numero di giri al minuto. Se da una parte una diminuzione del diametro del rocchetto comporta un beneficio in termini di diminuzione della coppia necessaria, con conseguente possibilità di spingersi a velocità più elevate, d'altro canto si ha una diminuzione della velocità tangenziale che contrasta quanto appena detto. Viceversa, se per diminuire le velocità di rotazione ed usufruire quindi di una maggior coppia motrice si aumenta il diametro del rocchetto, questo provoca un incremento di coppia richiesta a parità di tensione nei cavi. Si ha pertanto, al variare di Φ_r , un comportamento duale di coppia e velocità di rotazione. Una soluzione di compromesso può essere individuata ad esempio ricercando un valore ottimale del diametro, in grado di minimizzare il tempo ciclo di una scansione completa del piano di lavoro.

Per pervenire ad una soluzione del problema di dimensionamento del gruppo motore-rocchetto è stato imposto $\Phi_r = 30 \text{ mm}$ per farsi un'idea delle coppie in gioco e della taglia dei due attuatori. Con questo valore di primo tentativo la massima coppia statica richiesta risulta:

$$C_{S_MAX} = rT_{S_MAX} = 0,015 * 50 = 0,75 \text{ Nm}$$

A questa coppia statica si sommano i termini inerziale e viscoso, pertanto la coppia richiesta sarà sicuramente più elevata. Per questo motivo è stato considerato $C_{MAX} = 1 \text{ Nm}$ come valore di riferimento per la ricerca del motore all'interno dei cataloghi dei produttori di motori passo-passo.

Entrando nel catalogo dell'azienda *Orientalmotor* si viene indirizzati sui motori con flangia di fissaggio da 56.4 mm ; i motori di questa taglia sono infatti quelli più piccoli che riescono a garantire una coppia di pull-out superiore ad 1 Nm alle basse velocità. Fra questi i più interessanti sono quelli che offrono una

pull-out torque che cala più lentamente all'aumentare dei *rpm*; ciò significa che è possibile lavorare all'interno di un più ampio range di velocità. Si osservino in *fig. 9.9* le curve di pull-out dei codici: *PKP266D28A-L*, *PKP268D28A-L* e *PKP268U30A-L*.

I motori *a* e *b* sono di tipo bipolare mentre *c* è unipolare. Tutti e tre i motori

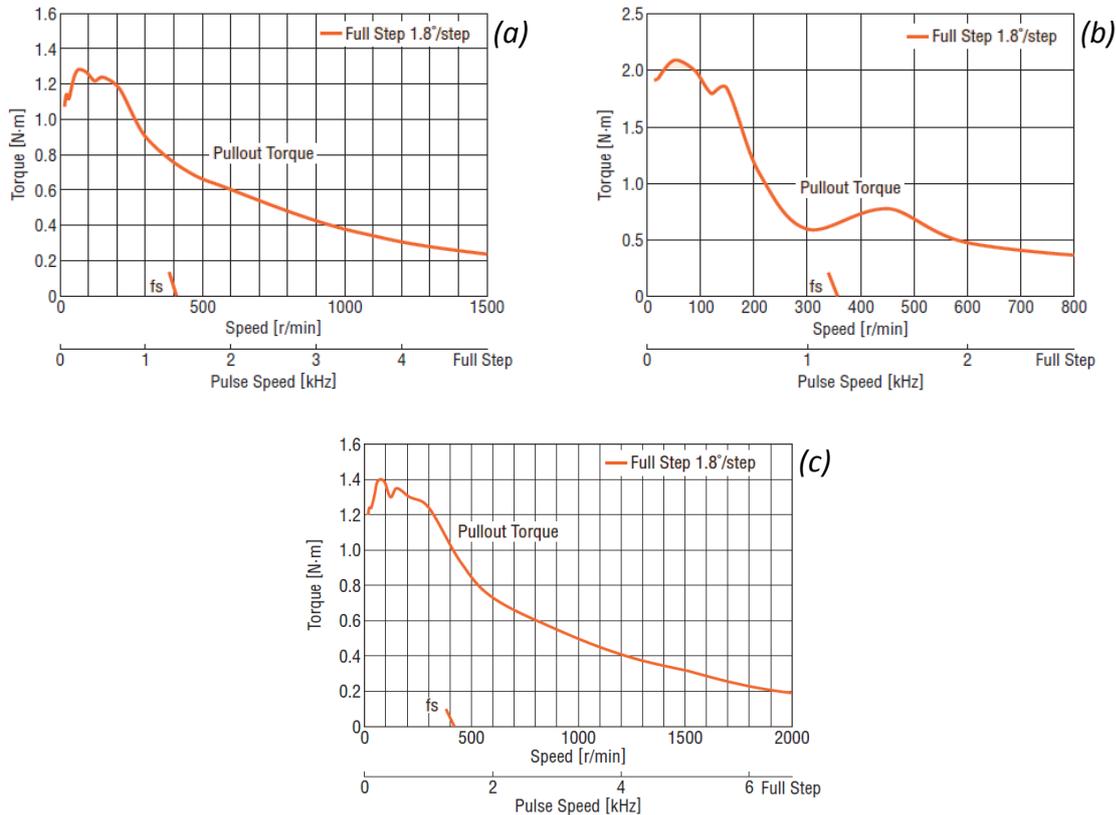


Figura 9.9: Curve di pull-out dei motori: a) *PKP266D28A-L*, b) *PKP268D28A-L*, c) *PKP268U30A-L*

garantiscono coppie superiori a 1 Nm alle basse velocità senza perdere il passo. Se si confrontano *a* e *b* si osserva che il secondo raggiunge coppie più elevate ma è in grado di mantenerle per un minor range di velocità e superati i 300 rpm la coppia disponibile si assesta attorno ai $0,5 \text{ Nm}$. Il motore *c* presenta un comportamento intermedio rispetto agli altri due e, sebbene abbia un costo leggermente superiore (57 € a fronte di 47 €), viene scelto per l'attuazione dei due assi del prototipo. L'*Orientalmotor* fornisce anche il supporto di fissaggio adatto alla taglia di motore scelta.

A questo punto è possibile applicare l'algoritmo di ottimizzazione del moto, già descritto nel capitolo precedente, introducendo però alcune righe di codice che tengano conto della variazione di diametro dovuta al progressivo

avvolgimento/svolgimento del cavo attorno al rocchetto. Infatti, se si sceglie di utilizzare un normale rocchetto, è inevitabile che ad ogni giro del motore il cavo si accavalli e si avvolga su sé stesso allontanando sempre più il punto di stacco dal centro di rotazione. Questo comporta un incremento della velocità tangenziale ed un incremento della coppia richiesta dei quali bisogna tener conto.

Un modo piuttosto semplice per considerare la variazione del diametro dell'avvolgimento è ipotizzare che il cavo si accavalli regolarmente ogni n giri dando origine ad un nuovo strato di avvolgimento. In questo modo ogni n giri il raggio dell'avvolgimento aumenta di un valore pari al diametro del cavo d_c . Quanto appena detto è ovviamente un comportamento ideale; in realtà il cavo tenderà ad avvolgersi sempre attorno allo stesso punto sormontandosi in continuazione un po' di qua e un po' di là in modo disordinato. Se però si realizza un rocchetto con una zona di avvolgimento molto ristretta, il comportamento reale può essere approssimato a quello ideale.

A livello di script di calcolo, prima di implementare l'analisi cinematica e dinamica, si eseguono i seguenti step:

1. Calcolo della massima lunghezza dell' i -esimo cavo a partire dalle dimensioni geometriche del piano di lavoro;
2. Simulazione dell'avvolgimento incrementando di d_c il raggio della bobina ogni n giri, con variazione lineare tra uno strato e l'altro;
3. Assegnazione, ad ogni possibile lunghezza del cavo svolto, il corrispettivo raggio della quota-parte avvolta.

A valle di questa simulazione si può costruire il grafico illustrato in *fig. 9.10*.

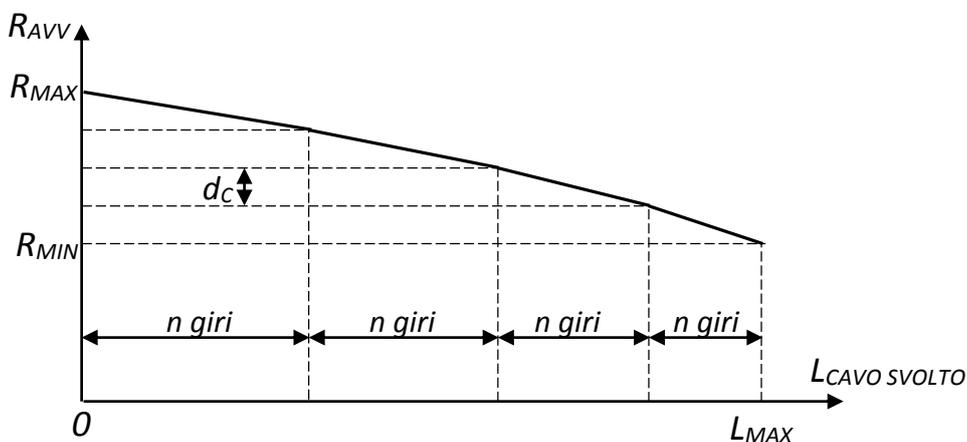


Figura 9.10: Curva del raggio dell'avvolgimento in funzione della lunghezza del cavo

Avvolgendo un filo da pesca di diametro $d_c = 0,6 \text{ mm}$ attorno ad un rocchetto con una cava larga 3 mm , si ottiene uno strato di avvolgimento ogni $n = 5 \text{ giri}$. Inserendo questi dati nello script del moto ottimale con controllo di coppia, integrato con la variazione del diametro di avvolgimento, ci si ricava la seguente tabella che fornisce i tempi ciclo al variare del raggio base dei rocchetti:

r_{MIN} [mm]	r_{MAX} [mm]	T_c [s]
10,0	13,0	52,6
15,0	17,4	39,1
20,0	21,8	31,6
25,0	26,2	26,7
30,0	31,2	24,0
35,0	35,6	22,0
40,0	40,6	20,4
45,0	45,6	19,4
50,0	50,6	19,2
55,0	55,6	19,9
60,0	60,6	24,8

Tabella 9.1: Tempo del ciclo di scansione totale al variare del raggio base dei rocchetti

Il calcolo svolto non tiene conto della variazione dell'inerzia rotazionale dovuta alle differenti dimensioni dell'avvolgitore. Dalla tabella emerge che il rocchetto con il quale si ottiene il minor tempo per coprire l'intera area di scansione è caratterizzato da un diametro compreso fra i 100 e i 110 mm. Un avvolgitore di queste dimensioni è tuttavia abbastanza ingombrante. Inoltre si può osservare che passare da un raggio di 35 mm ad un raggio di 50 mm non comporta una considerevole diminuzione del tempo ciclo. Per privilegiare una soluzione con dimensioni contenute si è deciso di realizzare un rocchetto con raggio di 15 mm. Sarà comunque possibile, in seguito, aumentare il raggio minimo di avvolgimento semplicemente accumulando una maggior quantità di filo da non svolgere.

Il modello del rocchetto disegnato al CAD è raffigurato in *fig. 9.11*. Poiché realizzare un pezzo unico sarebbe risultato piuttosto costoso, sono state pensate quattro parti da assemblare insieme:

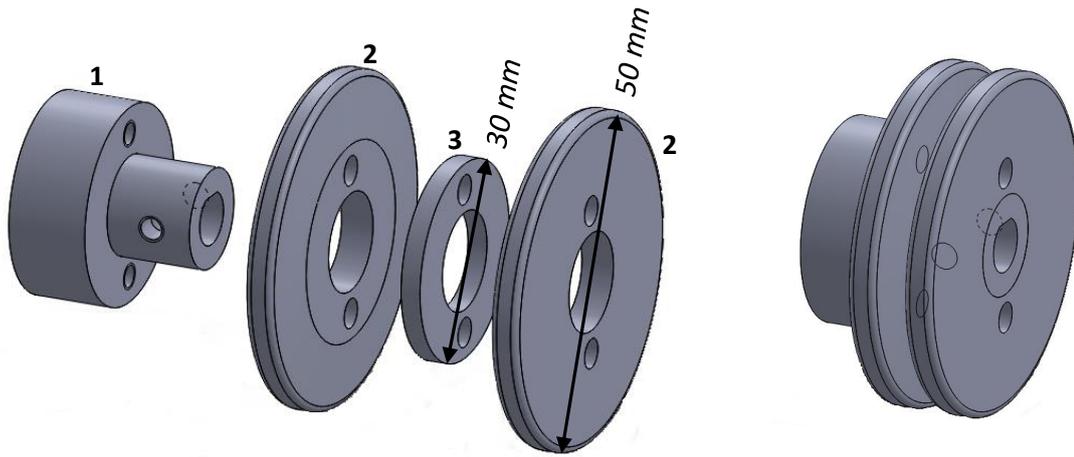


Figura 9.11: Rocchetto di avvolgimento: a) vista esplosa, b) rocchetto assemblato

1. *Rocchetto base*: costituisce l'anima del rocchetto sulla quale si agganciano gli altri pezzi; presenta una cava centrale per l'inserimento dell'albero motore che verrà fissato per mezzo di due grani.
2. *Anelli laterali*: sono le due sponde di contenimento del filo avvolto. Presentano una leggera conicità per agevolare l'erogazione del filo.
3. *Anello centrale*: rappresenta la zona ristretta (larghezza di 3 mm) attorno alla quale avviene l'avvolgimento.

Questi pezzi saranno realizzati in delrin, un materiale plastico molto rigido e resistente ampiamente utilizzato dall'azienda.

9.5 Sistema passa-cavi

È fondamentale che sul piano di lavoro siano presenti due punti che fungano da estremi fissi da cui partire per la misura delle lunghezze dei cavi. Questi punti coincidono con la posizione dei passa-cavi la cui funzione è quella di fare in modo che le forze di tensione agiscano sui rocchetti sempre con la stessa direzione e quindi i sistemi avvolgitori siano sollecitati solo radialmente e torsionalmente, e non assialmente.

Per uno studio più approfondito si dovrebbe trovare il modo di ridurre il più possibile l'attrito durante il passaggio del cavo per limitarne l'usura in esercizio. Ad esempio si potrebbe pensare di utilizzare un contatto rotante mediante una o due piccole pulegge. A livello di prototipo è sufficiente impiegare due occhielli fissati a telaio; in questo caso si è optato per due golfari.

9.6 Pannelli di copertura e completamento della macchina

La copertura ha il compito di separare, e proteggere in una certa misura, i componenti interni della macchina dall'ambiente esterno. Seconda ma più importante questione, occorre mantenere l'end-effector all'interno del piano verticale di lavoro annullando le oscillazioni fuori piano. Due pannelli rettangolari posizionati l'uno davanti all'altro e distanziati tra loro dall'ingombro del porta-antenna possono svolgere efficacemente quanto sopra richiesto. Dunque, sono stati disegnati e realizzati due pannelli in plexiglass costituenti la copertura del modulo.

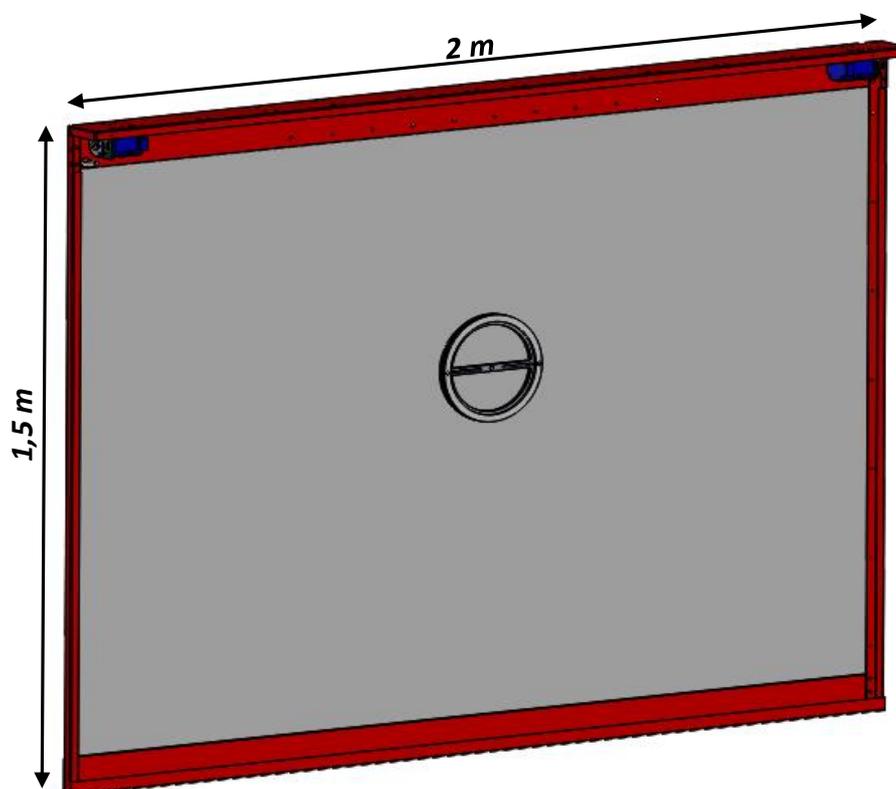


Figura 9.12: Modello solido del pannello (mancano cavi e copertura anteriore)

In *figura 9.12* si può vedere il modello completo della macchina ed in *figura 9.13* si mette in luce la posizione di un sistema avvolgitore.

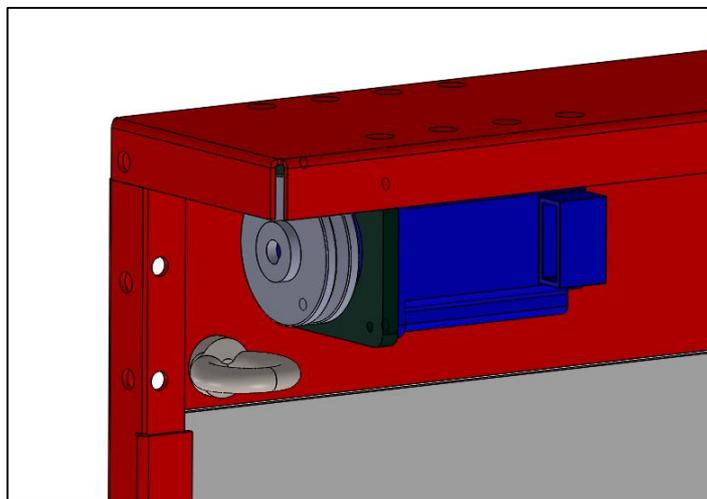


Figura 9.13: Vista di dettaglio - gruppo motore-rocchetto

A questo punto tutti i componenti sono stati modellati ed è possibile procedere con la produzione, assegnata a ditte esterne, e l'assemblaggio. Nel seguito si riportano le immagini di quello che è stato realizzato.

Porta-antenna



Figura 9.14: Porta-antenna RFID - versione 1



Figura 9.15: Porta-antenna RFID - versione 2



Figura 9.16: Confronto dei due porta-antenna

Rocchetto di avvolgimento



Figura 9.17 Componenti del rocchetto



Figura 9.18: Rocchetto assemblato

Gruppo motore-rocchetto e passa-cavo

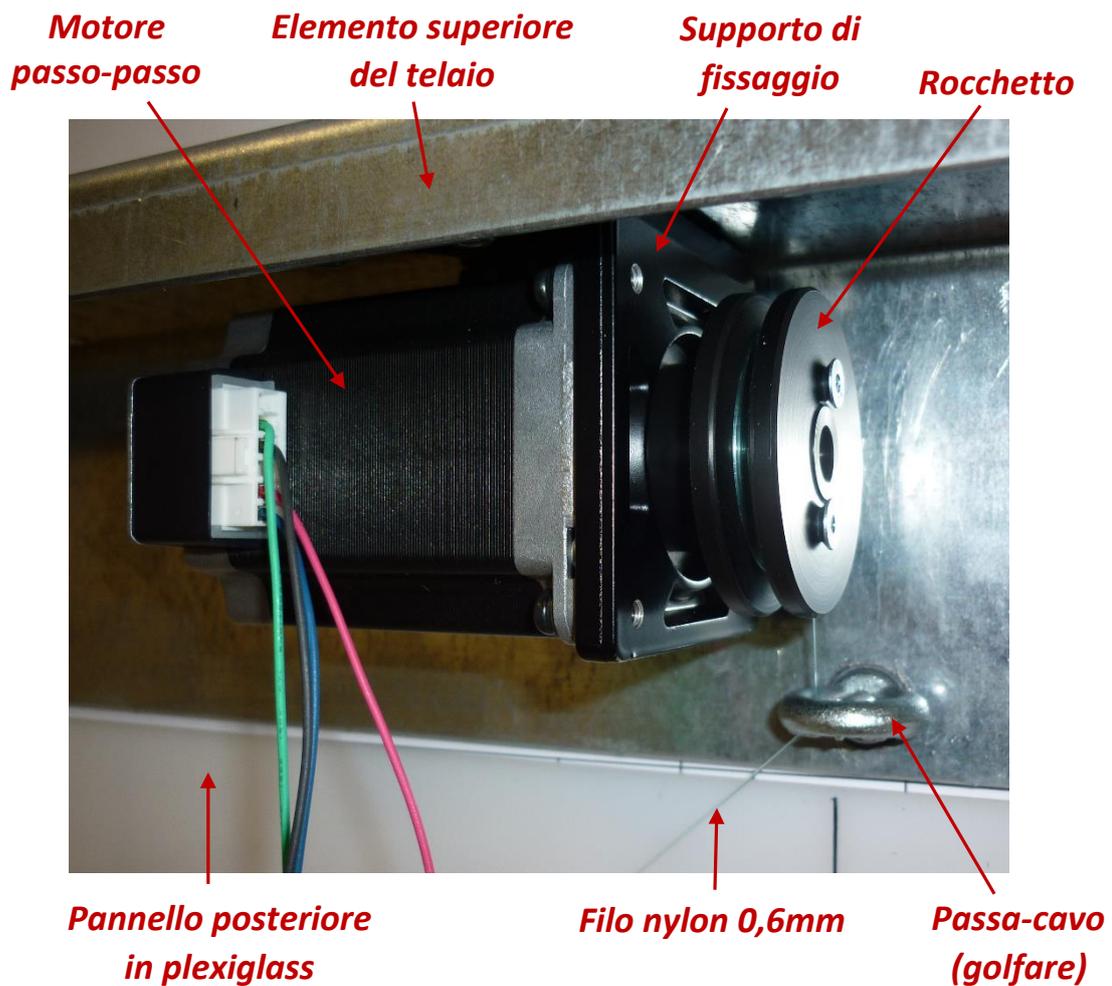


Figura 9.19: Motore passo-passo, rocchetto, passa-cavo

Prototipo completo (parte meccanica)



Figura 9.20: Pannello assemblato (manca copertura anteriore)

9.7 Quadro elettrico

Come spiegato in precedenza, la componentistica elettronica deve essere acquistata da un fornitore. Si necessitano di due *driver* per l'alimentazione dei motori ed un controllore al quale fornire le informazioni per la regolazione del movimento. Il movimento che si vuole ottenere non è un tipico spostamento punto a punto in cui si impongono posizione di partenza e posizione di arrivo ed una legge di moto trapezoidale viene generata automaticamente da un normale controllore, magari imponendo le due rampe di accelerazione. Dalle analisi svolte al calcolatore si estrae una tabella in cui si forniscono gli angoli di rotazione dei due motori in funzione del tempo secondo delle leggi polinomiali di quinto grado.

Questa tabella deve essere convertita in un linguaggio comprensibile dall'unità di controllo che dovrà "leggerla" ed inviare i giusti comandi ai due *driver*. Per fare ciò ci si è rivolti all'elettronica di *Beckhoff*, specializzata nella realizzazione di sistemi aperti per l'automazione con tecnologia di controllo basata su PC. La componentistica Beckhoff si distingue per efficace modularità ed efficiente compattezza dei "blocchi" di controllo che si ottengono assemblando le varie parti.

In seguito ad una consulenza con un rappresentante della Beckhoff, nella quale è stato concordato come sarebbe stato configurato il quadro elettrico, sono stati ordinati:

- Due driver per motori passo-passo, codice *EL7047*, alimentate fino a 50 V e fino a 5 A, in grado di operare un'eccitazione a due fasi.
- Un embedded PC, codice *CX9020-0112*, con sistema operativo Microsoft Windows Embedded Compact 7, microSD da 512 MB e porte di connessione USB, Ethernet e DVI.
- Un Buffer Capacitor Terminal, codice *EL9570*, per stabilizzare le tensioni di alimentazione.

I dispositivi elettronici sopra elencati si collegano tra loro secondo il seguente ordine:

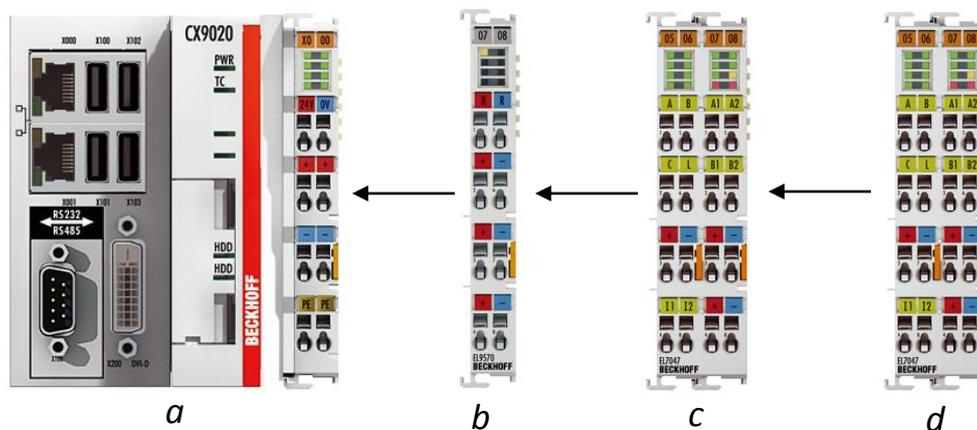


Figura 9.21: Assemblaggio a) Embedded PC, b) Buffer Capacitor Terminal, c) driver 1, d) driver 2

Il quadro elettrico, completo di interruttore ed alimentatore, è stato poi realizzato montando tutto su una guida DIN fissata ad un supporto in truciolato (fig. 9.23).

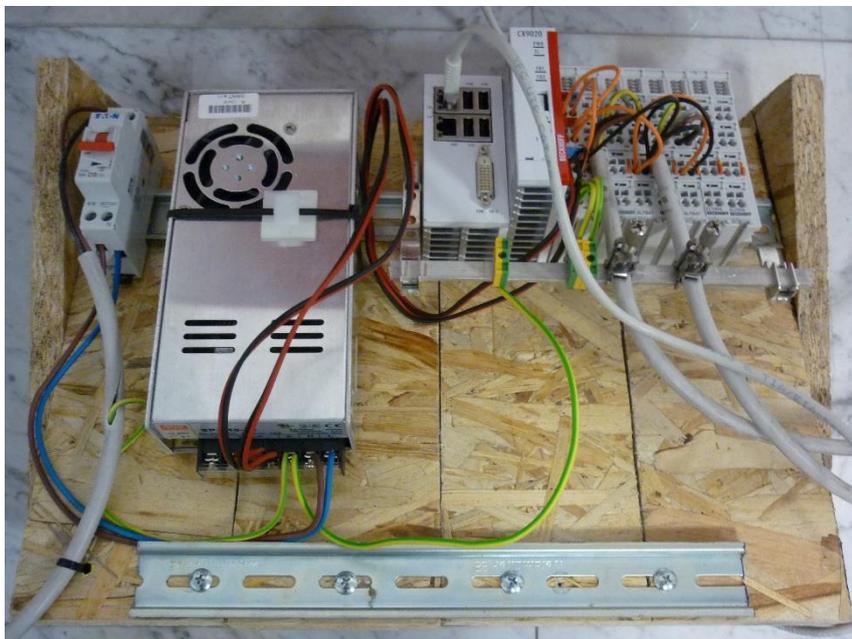


Figura 9.22: Quadro elettrico

CAPITOLO 10

AVVIO DELLA MACCHINA E RISULTATI CONSEGUITI

In questo ultimo capitolo si parla del reale funzionamento di tutto quello che fino ad ora è stato studiato, progettato e realizzato. Si descriveranno i risultati e le problematiche riscontrate che costituiranno la base di partenza per gli sviluppi futuri che seguiranno il lavoro svolto in questa tesi.

10.1 Verifica del raggio dell'avvolgimento

Nel capitolo precedente si è discusso del problema della variazione del diametro dell'avvolgimento ed è stata proposta una legge che approssima tale variazione in funzione della lunghezza del cavo svolto. Conviene dunque verificare, prima di iniziare le prove di movimento, che il comportamento stimato non sia troppo distante dalla realtà.

Per prima cosa i due fili di nylon utilizzati come cavi sono stati tagliati, in egual misura, ad una lunghezza superiore di quella massima calcolata sul piano di lavoro. Successivamente, con il calibro, si sono misurati i raggi della bobina corrispondenti alle condizioni di minimo e massimo avvolgimento:

$$r_{min} = 17 \text{ mm} \quad ; \quad r_{max} = 19 \text{ mm}$$

Queste misure sono poi state confrontate con quelle teoriche calcolate con lo script di calcolo (*fig. 10.1*).

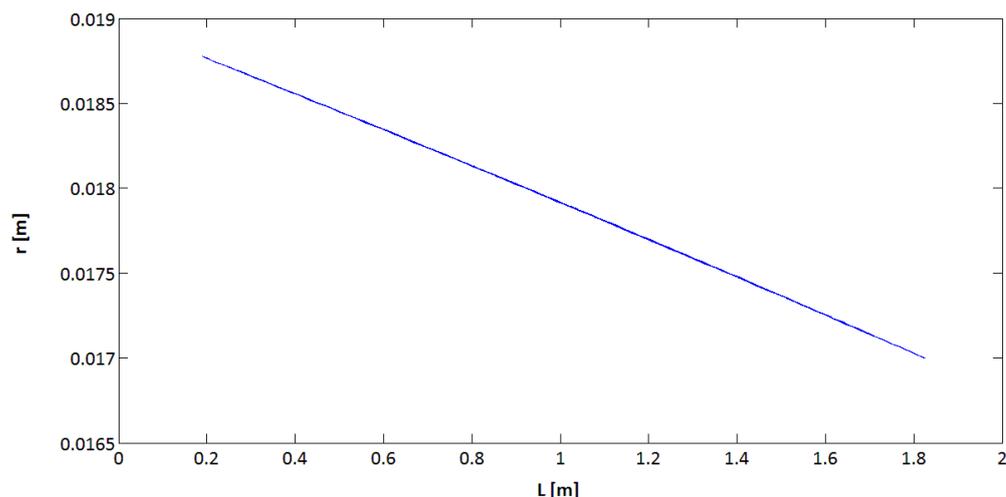


Figura 10.1: Variazione stimata del raggio di avvolgimento

Alla minima lunghezza di cavo svolto, il massimo raggio teorico è pari a 18.8 mm che è molto prossimo a quello reale misurato. Lo stesso confronto è stato fatto per lunghezze intermedie ed i valori misurati si sono sempre dimostrati di poco differenti da quelli teorici. Pertanto la legge stimata di variazione del raggio della bobina può essere mantenuta.

10.2 Set-up della macchina

Per far eseguire il movimento al robot occorre impostare i vari parametri interni al software di controllo e caricare le informazioni per il movimento coordinato dei due motori. La comunicazione, tra il PC embedded ed un PC esterno collegato ad esempio via ethernet, avviene grazie al software *TwinCAT*. Il TwinCAT permette l'inserimento in memoria di tutti i dati necessari (logica di controllo, informazioni per il movimento, ecc.) e permette anche di comandare la macchina in tempo reale. Vi sono due spazi di lavoro ai quali si accede con il TwinCAT:

- *TwinCAT System Manager*: adibito alla configurazione del sistema; si identificano e “linkano” tra loro le parti che costituiscono gli assi elettrici e si impostano i parametri.

- *TwinCAT PLC Control*: spazio in cui si scrivono i software per il funzionamento della macchina.

I principali parametri da settare sono quelli di targa relativi ai due motori:

Tensione di alimentazione	24 V
Corrente nominale	3 A
Resistenza di fase	1,05 Ω /phase
Induttanza	1,96 Ω /phase
Numero di step al giro	200 stp/giro

Per ricavare il movimento a partire da una tabella di valori calcolati con il codice di calcolo, è stato sviluppato un programma “*ad hoc*” per il TwinCAT. In pratica, con il programma scritto al matlab si compila una tabella delle posizioni dei motori in funzione del tempo e si crea un file in formato CSV. Successivamente il file viene importato all’interno del PC embedded e viene letto dal TwinCAT che ne esegue le istruzioni. Il controllo esegue un’eccitazione con microstepping di 1/64 di passo. Lo start della macchina deve essere eseguito solo dopo aver posizionato l’elemento terminale sul punto di zero prestabilito.

10.3 Prove e risultati

La posizione di zero macchina è stata imposta al centro dell’area rettangolare di lavoro. Da lì l’end-effector dovrà raggiungere l’angolo in basso a sinistra del piano ed iniziare il percorso programmato per coprire l’intera area e tornare poi allo zero. La legge di moto ottima, per il prototipo realizzato, è caratterizzata dalle curve di velocità e coppia, dei motori, rappresentate in *fig. 10.2* e *10.3*.

Prima di far muovere la macchina, però, si è svolto un test sui motori facendoli girare a vuoto. Si è notato che, con l’alimentazione a 24 V, vi sono problemi a superare i 2000 *step/s*, corrispondenti a 600 *rpm*, perché il motore entra in risonanza e perde il passo. Inoltre questa risonanza si sposta se si fissa più o meno intensamente il motore al telaio. Alimentando a 48 V, invece, la risonanza cade

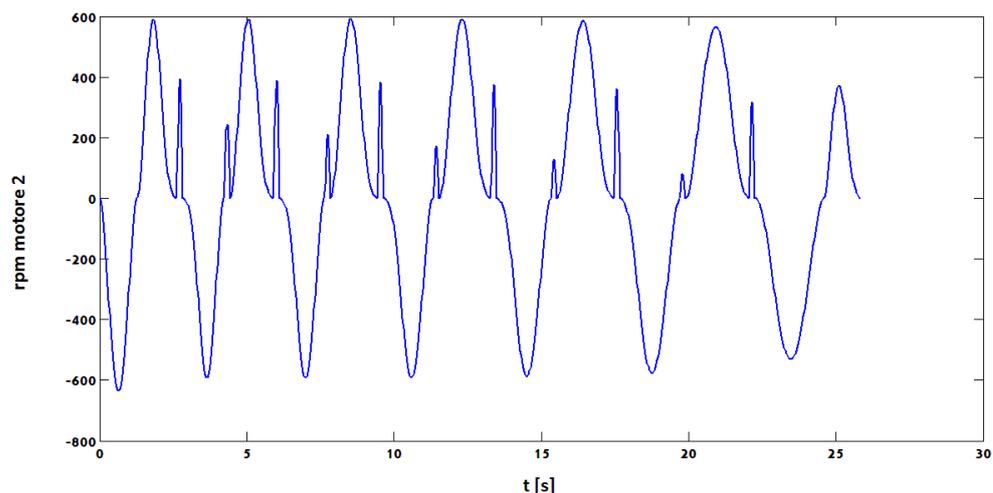


Figura 10.2: Velocità di rotazione del motore 2

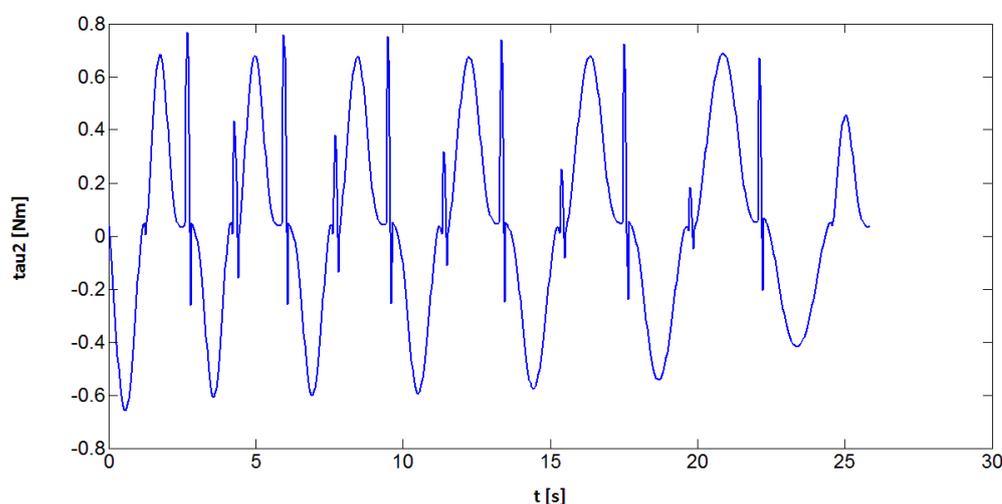


Figura 10.3: Coppia richiesta al motore 2

attorno ai 3000 *step/s* (900 *rpm*). Sapendo ciò si può già pensare di imporre, all'interno dell'algoritmo di calcolo, un limite sulla velocità di rotazione dei motori in corrispondenza dei 600 *rpm* o 900 *rpm*, a seconda del voltaggio di alimentazione, magari tenendosi al di sotto con un certo margine.

Le prove condotte con la prima versione dell'end-effector (peso di circa 0,7 kg) ed imponendo la legge di moto sopra illustrata non sono andate subito a buon fine. Nel primo caso, con alimentazione a 24 V, come era prevedibile, si sono raggiunte le condizioni di risonanza che hanno fatto perdere il passo ad uno dei due motori perdendo anche il controllo del movimento. Nel secondo caso invece, con alimentazione a 48 V, il moto si è bloccato durante la prima corsa verticale, forse a causa della repentina accelerazione. È bastato imporre una legge di moto

meno spinta, facendo in modo di dilatare i tempi di percorrenza, soprattutto durante le corse verticali, per ottenere il corretto funzionamento della macchina con un tempo ciclo che si aggira attorno ai 40 s. Con corretto funzionamento si intende soprattutto il fatto che non si ha perdita di passi durante il ciclo e, alla fine, l'elemento terminale si posiziona esattamente sul punto di zero. Questo è molto importante dal momento che non è stato sviluppato un controllo in retroazione di posizione.

Non avendo previsto un sistema di misura dell'effettiva posizione dell'end-effector non è stato possibile ricavare una misura degli errori di posizionamento. Visivamente però si è riscontrato che le traiettorie vengono seguite in modo più che soddisfacente senza percepire globalmente rilevanti irregolarità.

Vi sono però due fenomeni che creano oscillazioni indesiderate, soprattutto durante l'attraversamento della parte alta del piano:

- *Elasticità dei cavi*: il filo in nylon di 0,6 mm, scelto per il costo irrilevante e per la più immediata reperibilità, presenta un'elasticità non trascurabile nel momento in cui agiscono carichi di una certa entità. Più l'elemento terminale si avvicina alla condizione di allineamento dei due fili e più questi vengono sollecitati e si allungano. Pertanto, soprattutto durante l'ultima corsa orizzontale, si osserva che l'end-effector non percorre un tratto rettilineo ma piuttosto un arco di cerchio con abbassamento massimo in corrispondenza della mezzeria.
- *Avvolgimento non omogeneo*: durante la rotazione dei rocchetti, i cavi si avvolgono e svolgono in modo non ordinato e accade che ogni tanto si ha un "salto" del filo che cade su un livello più in basso. Ciò si traduce in un visibile balzo verso il basso dell'elemento terminale.

Si può affermare che complessivamente la macchina lavora discretamente, sebbene presenti i due fenomeni sopra descritti che possono comunque essere attenuati con interventi futuri.

10.4 Considerazioni finali e sviluppi futuri

Con lo sviluppo di questa tesi si è dimostrata la validità dell'impiego di un robot a cavi per la movimentazione su un piano verticale di un'antenna RFID per la lettura del contenuto di un generico box. In particolare, si è visto come la soluzione mediante due soli attuatori si sia rivelata efficace, di semplice realizzazione e rappresenta sicuramente un'interessante soluzione a basso costo. La scelta di un'attuazione di tipo passo-passo ha permesso di fare a meno di componenti aggiuntivi, quali riduttore di giri ed encoder per la retroazione, semplificando al massimo gli assi elettrici. Inoltre con il lavoro svolto l'azienda ha conseguito un'esperienza in ambito di step-motor e si è affacciata ad una differente elettronica di controllo, più evoluta di quella usualmente impiegata.

Il robot è stato studiato cercando di ottenere le più alte prestazioni in termini di minimo tempo necessario per la scansione dell'intera area di lavoro e di massimo sfruttamento della coppia motrice. Il movimento ottenuto è più che accettabile per l'applicazione in esame e può sicuramente essere migliorato ulteriormente agendo su quei fenomeni che comportano irregolarità.

Per ridurre l'influenza dell'elasticità dei fili la soluzione sta nel ricorrere a cavi inestensibili, ad es. cavi in *Dyneema*, una fibra sintetica particolarmente resistente e praticamente esente da elasticità. Questi particolari cavi vengono anche venduti con una trama superficiale anti usura.

Per il completamento del prodotto, in futuro dovranno essere affrontate le seguenti questioni non ancora studiate:

- Influenza del cavo dell'antenna RFID;
- Dimensionamento dell'antenna RFID in termini di potenza di lettura;
- Ricerca dello zero macchina;
- Sviluppo del software che associa ad ogni lettura la posizione dell'oggetto percepito.

Appendice

È di seguito riportato lo script di calcolo della “*function*” scritta al Matlab per l’analisi statica e dinamica di un generico tratto rettilineo di traiettoria. In questo programma è presente anche il controllo di coppia.

```
function
[X0, Y0, ti, t0, Xc, Yc, Vc, Ac, Vxc, Vyc, Axc, Ayc, x1c, x2c, y1c, y2c, L1c, V1c, A1c, L
2c, V2c, A2c, teta1c, teta2c, beta1c, beta2c, beta1_ic, beta2_ic, beta1_iic, bet
a2_iic, tau1c, tau2c, a_minc, a_maxc, T1c, T2c, rpm1c, rpm2c, m, r1c, r2c, stp1c, s
tp2c] =
corsa_ottima(X0, Y0, alpha, Sco, Scv, Sc, l, h, M, J, C, Fp, Tmax, Tmin, passo, tau_m
ax, t0, sgo, sgv, L10, L20, r10, r20, L, r, L_max, aa)

%impongo una legge di moto lineare al solo scopo di ricavarne la fascia
%di accelerazioni ammissibili, compatibili con il limite massimo di
%tensione dei cavi Tmax
to = 0:99;
Xi(1:100) = X0+sgo*(Sco/99*to);
Yi(1:100) = Y0+sgv*(Scv/99*to);

x1i(1:100) = Xi(1:100);
y1i(1:100) = h-Yi(1:100);
x2i(1:100) = l-Xi(1:100);
y2i(1:100) = h-Yi(1:100);
L1i(1:100) = sqrt(x1i(1:100).^2+y1i(1:100).^2);
%Li = lunghezza dell'i-esimo cavo (a partire dal passa-cavo)
L2i(1:100) = sqrt(x2i(1:100).^2+y2i(1:100).^2);
teta1i(1:100) = 2.*pi-acos(x1i(1:100)./L1i(1:100));
%tetai = inclinazione dell'i-esimo cavo rispetto la direzione
%orizzontale
teta2i(1:100) = pi+acos(x2i(1:100)./L2i(1:100));

%calcolo della banda di accelerazione ammissibile (a_min, a_max)
for i=1:100
    S = [-cos(teta1i(i)) -cos(teta2i(i)); -sin(teta1i(i))
        -sin(teta2i(i))];
    Z = S\M;
    Di = S\Fp;
    p1 = Z(1,1)*cos(alpha)+Z(1,2)*sin(alpha);
    p2 = Z(2,1)*cos(alpha)+Z(2,2)*sin(alpha);

    if p1>0 && p2>0
        a_mini(i) = max((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmin)/p2);
        a_maxi(i) = min((Di(1)+Tmax)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
    else if p1<0 && p2<0
        a_mini(i) = max((Di(1)+Tmax)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
        a_maxi(i) = min((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmin)/p2);
    else if p1>0 && p2<0
        a_mini(i) = max((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
        a_maxi(i) = min((Di(2)+Tmin)/p2, (Di(1)+Tmax)/p1);
    else a_mini(i) = max((Di(2)+Tmin)/p2, (Di(1)+Tmax)/p1);
        a_maxi(i) = min((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
    end
end
```

```

                end
            end
        end

%calcolo del tempo minimo di attraversamento relativo ad una legge di
%moto polinomiale di quinto grado
asup_min = min(a_maxi(1:50));
ainf_max = abs(max(a_mini(51:100)));
a_max_ast = min(asup_min,ainf_max);
deltat_min = sqrt(10*Sc/(a_max_ast*sqrt(3)));
Tc = deltat_min;

diff = 1;

%calcolo della legge di moto ottimale compatibile con i limiti di coppia
%dei motori (aumento il tempo minimo di attraversamento, prima calcolato,
%finchè non vengono rispettati i limiti di coppia, compatibile con gli
%rpm, in tutti i punti della traiettoria)
while diff==1
    if Tc>40
        disp('tempi troppo lunghi')
        break
    end
    t = 0:passo:Tc;
    m = size(t,2);
    Xc(1:m) = X0+sgo*(10*(Sco/Tc^3)*t.^3
                -15*(Sco/Tc^4)*t.^4+6*(Sco/Tc^5)*t.^5);
    Yc(1:m) = Y0+sgv*(10*(Scv/Tc^3)*t.^3
                -15*(Scv/Tc^4)*t.^4+6*(Scv/Tc^5)*t.^5);
    Vc(1:m) = 30*(Sc/Tc^3)*t.^2-60*(Sc/Tc^4)*t.^3+30*(Sc/Tc^5)*t.^4;
    Ac(1:m) = 60*(Sc/Tc^3)*t-180*(Sc/Tc^4)*t.^2+120*(Sc/Tc^5)*t.^3;
    Vxc(1:m) = Vc(1:m)*cos(alpha);
    Vyc(1:m) = Vc(1:m)*sin(alpha);
    Axc(1:m) = Ac(1:m)*cos(alpha);
    Ayc(1:m) = Ac(1:m)*sin(alpha);

    x1c(1:m) = Xc(1:m);
    x1_ic(1:m) = Vxc(1:m);
    x1_iic(1:m) = Axc(1:m);
    y1c(1:m) = h-Yc(1:m);
    y1_ic(1:m) = -Vyc(1:m);
    y1_iic(1:m) = -Ayc(1:m);
    x2c(1:m) = 1-Xc(1:m);
    x2_ic(1:m) = -Vxc(1:m);
    x2_iic(1:m) = -Axc(1:m);
    y2c(1:m) = h-Yc(1:m);
    y2_ic(1:m) = -Vyc(1:m);
    y2_iic(1:m) = -Ayc(1:m);
    L1c(1:m) = sqrt(x1c(1:m).^2+y1c(1:m).^2);
    V1c(1:m) = (x1c(1:m).*x1_ic(1:m)+y1c(1:m).*y1_ic(1:m))./L1c(1:m);
    A1c(1:m) = (L1c(1:m).*(x1_ic(1:m).^2+y1_ic(1:m).^2+x1c(1:m)
                .*x1_iic(1:m)+y1c(1:m).*y1_iic(1:m))-(x1c(1:m)
                .*x1_ic(1:m)+y1c(1:m).*y1_ic(1:m)).*V1c(1:m))
                ./L1c(1:m).^2;
    L2c(1:m) = sqrt(x2c(1:m).^2+y2c(1:m).^2);
    V2c(1:m) = (x2c(1:m).*x2_ic(1:m)+y2c(1:m).*y2_ic(1:m))./L2c(1:m);
    A2c(1:m) = (L2c(1:m).*(x2_ic(1:m).^2+y2_ic(1:m).^2+x2c(1:m)
                .*x2_iic(1:m)+y2c(1:m).*y2_iic(1:m))-(x2c(1:m)
                .*x2_ic(1:m)+y2c(1:m).*y2_ic(1:m)).*V2c(1:m))
                ./L2c(1:m).^2;

```

```

tetalc(1:m) = 2.*pi-acos(x1c(1:m)./L1c(1:m));
teta2c(1:m) = pi+acos(x2c(1:m)./L2c(1:m));

%trovo, per ogni valore di lunghezza cavo, il corrispettivo valore del
%raggio rocchetto in base alla legge polinomiale r=f(L)
for i=1:m
    for j=1:size(L,2)
        scos1(j) = abs(L(j)-L1c(i));
    end
    scos1_min = min(scos1);
    for j=1:size(L,2)
        if scos1_min == abs(L(j)-L1c(i))
            r1c(i) = r(j);
        end
    end

    for j=1:size(L,2)
        scos2(j) = abs(L(j)-L2c(i));
    end
    scos2_min = min(scos2);
    for j=1:size(L,2)
        if scos2_min == abs(L(j)-L2c(i))
            r2c(i) = r(j);
        end
    end

end

%gli angoli di rotazione si ottengono integrando la legge: dbeta = 1/r*dL
for i=1:m
    betal1c(i) = 2*atan((2*aa(1)*L10+aa(2))/sqrt(4*aa(1)*aa(3)-aa(2)^2))/sqrt(4*aa(1)*aa(3)-aa(2)^2);
    beta2c(i) = 2*atan((2*aa(1)*L20+aa(2))/sqrt(4*aa(1)*aa(3)-aa(2)^2))/sqrt(4*aa(1)*aa(3)-aa(2)^2);
    stp1c(i) = 200*betal1c(i)/(2*pi);
    stp2c(i) = 200*beta2c(i)/(2*pi);
    beta1_ic(i) = -V1c(i)/r1c(i);
    beta2_ic(i) = -V2c(i)/r2c(i);
    beta_i = [beta1_ic(i) beta2_ic(i)]';
    beta1_iic(i) = -A1c(i)/r1c(i);
    beta2_iic(i) = -A2c(i)/r2c(i);
    beta_ii = [beta1_iic(i) beta2_iic(i)]';

    Xv = [Xc(i) Yc(i)]';
    Xv_i = [Vxc(i) Vyc(i)]';
    Xv_ii = [Axc(i) Ayc(i)]';
    S = [-cos(tetalc(i)) -cos(teta2c(i)); -sin(tetalc(i))
        -sin(teta2c(i))];
    rr = [r1c(i) 0; 0 r2c(i)];

    tau = S\(rr*M*Xv_ii+S*J*beta_ii+S*C*beta_i-rr*Fp);
    tau1c(i) = tau(1);
    tau2c(i) = tau(2);

    rpmlc(i) = beta1_ic(i)*60/(2*pi);

```

```

rpm2c(i) = beta2_ic(i)*60/(2*pi);

rpm1_i = ceil(abs(rpm1c(i)));
rpm2_i = ceil(abs(rpm2c(i)));
if rpm1_i == 0
    rpm1_i = 1;
end
if rpm2_i == 0
    rpm2_i = 1;
end
if rpm1_i>2000 || rpm2_i>2000
    diff = 1;
    break;
end
if abs(tau1c(i))>tau_max(rpm1_i) ||
    abs(tau2c(i))>tau_max(rpm2_i)
    diff = 1;
    break;
else diff = 0;
end

r_i = [1/r1c(i) 0; 0 1/r2c(i)];
T = r_i*(tau-(J*beta_ii+C*beta_i));
T1c(i) = T(1);
T2c(i) = T(2);
end

Tc = Tc+0.01;

end

%ricalclo la fascia di accelerazione ammissibile al solo fine di poterla
%visualizzare assieme alla legge di moto ottimale appena trovata
for i=1:m

    S = [-cos(teta1c(i)) -cos(teta2c(i)); -sin(teta1c(i))
        -sin(teta2c(i))];
    Z = S\M;
    Di = S\Fp;
    p1 = Z(1,1)*cos(alpha)+Z(1,2)*sin(alpha);
    p2 = Z(2,1)*cos(alpha)+Z(2,2)*sin(alpha);
    if p1>0 && p2>0
        a_minc(i) = max((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmin)/p2);
        a_maxc(i) = min((Di(1)+Tmax)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
    else if p1<0 && p2<0
        a_minc(i) = max((Di(1)+Tmax)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
        a_maxc(i) = min((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmin)/p2);
    else if p1>0 && p2<0
        a_minc(i) = max((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
        a_maxc(i) = min((Di(2)+Tmin)/p2, (Di(1)+Tmax)/p1);
    else a_minc(i) = max((Di(2)+Tmin)/p2, (Di(1)+Tmax)/p1);
        a_maxc(i) = min((Di(1)+Tmin)/p1, (Di(2)+Tmax)/p2);
    end
    end
end

end

ti(1:m) = t0+t;

```

```
t0 = ti(size(ti,2));  
X0 = Xc(m);  
Y0 = Yc(m);
```

```
end
```


Bibliografia

- [1] Appunti delle lezioni di “Progettazione di Macchine Automatiche” del Prof. Roberto Caracciolo.
- [2] Appunti delle lezioni di “Azionamenti dei sistemi meccanici”, Righettini, Scarpa.
- [3] T. Bruckmann, A. Pott (eds.), Cable Driven Parallel Robots – Proceedings of the Second International Conference on Cable-Driven Parallel Robots, *Mechanisms and Machine Science*.
- [4] A. Trevisani, P. Gallina, R. L. Williams II, Cable-Direct-Driven Robot (CDDR) with Passive SCARA Support: Theory and Simulation.
- [5] A. Trevisani, Experimental Validation of a Trajectory Planning Approach Avoiding Cable Slackness and Excessive Tension in Underconstrained Translational Planar Cable-Driven Robots.
- [6] R. L. Williams II, P. Gallina, Translational Planar Cable-Direct-Driven Robots, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*.
- [7] A. Trevisani, Underconstrained planar cable-direct-driven robots: A trajectory planning method ensuring positive and bounded cable tensions, *Mechatronics*.
- [8] www.promedicasrl.eu/it/prodotti/cabinets/item/226-promedica-cabinet.html
- [9] www.nexess-solutions.com/en/produits/smart-rfid-cabinet-2/
- [10] worldwide.espacenet.com/
- [11] www.wikipedia.it

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il Prof. Roberto Caracciolo per la disponibilità ed il supporto fornitomi.

Ringrazio poi Daint e tutto il suo personale, in particolar modo l'Ing. Roberto Guglielmi che mi ha accolto e supportato per tutta la permanenza in azienda, offrendomi preziosi consigli ed insegnamenti.

Un ringraziamento va anche al Prof. Alberto Trevisani che mi ha fornito degli importanti suggerimenti riguardo ai robot a cavi planari.

Infine ringrazio i miei genitori e tutta la mia famiglia per l'appoggio che mi hanno sempre dimostrato in questi anni.