

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE

—
TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
DELL'AUTOMAZIONE

SISTEMA DI CONTROLLO PER SOLLEVATORE TELESCOPICO

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: STEFANO MELONI

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

ai miei genitori

“ Se qualcosa può andar male, lo farà ”

EDWARD MURPHY

Indice

Sommario	VII
Introduzione	IX
1 I sistemi di sollevamento industriali	1
1.1 Il sollevatore telescopico	1
1.2 Problematiche legate alla stabilità	2
1.2.1 Sistemi di controllo della stabilità	3
2 Joystick a due gradi di libertà	5
2.1 Joystick	5
2.1.1 Percezione della forza	7
2.1.2 Risoluzione di posizione	7
2.1.3 Rigidezza	8
2.1.4 Controllo della forza	8
2.2 Asse di rollio	8
2.3 Asse di beccheggio	10
2.3.1 Freno elettromagnetico on-off	10
2.3.2 Molle di compressione	12
3 Schemi di controllo Simulink	15
3.1 Layout del sistema di simulazione	15
3.1.1 Postazioni PC	16
3.2 Modello degli azionamenti del sollevatore	20
3.3 Calibrazione del joystick	21
3.4 Modello semplificato del sollevatore	27
3.5 Controllo della stabilità	32
3.5.1 Comando di sollevamento	32
3.5.2 Comando di estensione	37
3.6 Invio dati	48

4	Test sperimentali	49
4.1	Procedura di test	49
4.2	Elaborazione dei dati	53
4.3	Visualizzazione delle prove	61
	Conclusioni	65
A	Calcolo del baricentro	67
A.1	Stima dell'inclinazione de braccio	67
A.2	Stima della posizione del baricentro totale	69
	Bibliografia	73

Sommario

Un sollevatore telescopico é una macchina movimento terra caratterizzata dall'avere un braccio costituito da più sfilì, che scorrono l'uno all'interno dell'altro. E' una macchina versatile che, a seconda dell'attrezzatura montata, permette di poter svolgere diversi tipi di lavori, dalla movimentazione di materiale pallettizzato al sollevamento di persone ed attrezzature.

Questo lavoro di tesi, inserito nel progetto MMT (Macchine Movimento Terra), é caratterizzato dallo studio di un sistema di controllo dell'elevatore in grado di fornire un'efficace padronanza degli attuatori, con un ritorno di forza proporzionale alle grandezze di interesse, coordinato da un'apposito dispositivo di sicurezza in grado di prevenire le situazioni di instabilità. Tale sistema di controllo é stato sviluppato in ambiente MATLAB su un modello matematico della macchina e fa uso di una serie di funzioni che permettono di stimare il valore delle coordinate del suo baricentro totale. La macchina viene visualizzata mediante un' interfaccia grafica ed é azionata esternamente da un joystick a 2 GDL a ritorno di forza.

Sono stati sviluppate varie strategie di controllo sullo stesso hardware, le quali permettono di interfacciarsi con l'ambiente di lavoro in maniera diversa.

In oltre, alla fine, tutti i sistemi sono stati testati con delle prove strutturate, in grado di creare un database con le informazioni di interesse, utili a dare giudizi sulla bontà delle scelte adottate e delle tarature utilizzate.

Il software sviluppato si integra con quello realizzato presso il Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale (DIMEG) dell'Università degli Studi di Padova.

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è quello di realizzare dei sistemi di controllo efficaci per un sollevatore telescopico, compatibili con le tipologie già in commercio, i quali prevedano l'utilizzo, come interfaccia, di un joystick a due gradi di libertà aptico, ovvero in grado di restituire sensazioni di forza correlate alle grandezze nell'ambiente di lavoro. Sono stati utilizzati degli schemi, i quali addotteranno in oltre algoritmi per utilizzare al meglio il joystick e calcoli sul baricentro della macchina per evitare situazioni di instabilità ed eventualmente segnalarle all'operatore tramite il joystick motorizzato.

Il primo capitolo introduce all'ambito in cui si svolge il lavoro. Il macchinario scelto, le sue caratteristiche principali, le problematiche presenti e le soluzioni fin ora adottate, in particolare il problema principale del controllo della stabilità.

Nel secondo capitolo viene descritto il sistema adottato per controllare la macchina, ovvero il joystick a due gradi di libertà. Seguono le caratteristiche tecniche del joystick e i problemi che si riscontrano nel fare di esso un'interfaccia aptica, ovvero in grado di fornire feedback relativi all'ambiente di lavoro.

Nel terzo capitolo viene presentato la parte principale del progetto. Si tratta della effettiva interazione, realizzata tramite elettronica e software, dell'utente con la macchina. Il software è implementato per la maggior parte con MATLAB e Simulink, e affronta i problemi di controllo di macchina e joystick, oltre a implementare varie strategie di utilizzo degli stessi.

Nel quarto capitolo si affronta il problema di dare riscontro pratico ai concetti teorici adottati, con una serie estesa di test effettuati da vari operatori, mirati a evidenziare la bontà o meno delle scelte e migliorare i risultati ottenuti. Gli esiti dei vari test sono stati archiviati per successive elaborazioni sia quantitative che qualitative.

Capitolo 1

I sistemi di sollevamento industriali

1.1 Il sollevatore telescopico

Il sollevatore telescopico é caratterizzato dall'avere un braccio costituito da più sfilì che scorrono l'uno all'interno dell'altro. Grazie alla disponibilità di molteplici attrezzature, ha svariate applicazioni. Può svolgere lavori di movimentazione materiale pallettizzato, di sollevamento persone ed attrezzature, di montaggio di pannelli e vetrate, di miscelazione e getto del calcestruzzo, di movimentazione in galleria. Quindi, i campi di impiego variano da quello dell'edilizia, al restauro, alle costruzioni, alla manutenzione dei ponti, alle cave, alle miniere, al trattamento dei rifiuti. Diverse case produttrici, come Merlo, Komatsu e Manitou, offrono sul mercato una tipologia di sollevatore telescopico detto frontale, (vedi 1.1), perchè non ha la torretta girevole, perciò il piano su cui lavora il braccio, una volta posizionata la macchina, rimane fisso.

Vi sono modelli privi di stabilizzatori in quanto hanno un braccio costituito da



Figura 1.1: Sollevatore telescopico WHT714 Komatsu

due soli sfilì che consente un'altezza di sollevamento di circa 9 metri, con capacità di carico di circa 3,5 tonnellate. Queste sono caratteristiche che permettono di avere una stabilità sufficiente, lavorando solo su gomma. Inoltre, aumentando le prestazioni della macchina, si hanno modelli con due stabilizzatori anteriori per poter avere un poligono di appoggio più grande, che garantisca una maggiore stabilità. Un'altra tipologia di sollevatore telescopico è quella con torretta girevole, che può ruotare di 360° così da permettere all'operatore di raggiungere qualunque punto di lavoro intorno alla macchina, senza il bisogno di doverla riposizionare. La cabina è studiata in modo tale da garantire la massima visuale all'operatore tanto da essere, in alcuni casi, inclinabile verso l'alto. Da un punto di vista strettamente tecnico, questi modelli possono essere definiti come l'evoluzione di due tipologie di macchine già esistenti, il sollevatore telescopico frontale e la gru mobile, permettendo di superarne le limitazioni d'impiego. Offrono un'eccezionale manovrabilità, sono polivalenti e, grazie al loro braccio telescopico porta-attrezzi, sono un'ottima soluzione nel lavoro in cantiere. Questi modelli hanno capacità di carico che spaziano dalle 4 alle 5 tonnellate ed hanno altezze di sollevamento che permettono di superare i 25 metri. Dispongono di quattro ruote motrici e di tre modalità di sterzata. Il modo di sterzata viene selezionato in funzione del tipo di terreno e del tipo di lavoro da eseguire. Si ha la sterzata a due ruote, obbligatoria per la circolazione stradale, a quattro ruote sterzanti in discordanza di fase (sterzata in tondo) e a quattro ruote sterzanti in concordanza di fase (sterzata a granchio). Per poter garantire una stabilità uniforme durante la rotazione della torretta, viene creata una base di appoggio con l'utilizzo di quattro stabilizzatori telescopici a forbice. Le diverse configurazioni di lavoro consentite, grazie agli stabilizzatori completamente sfilati o in posizione intermedia, permettono di lavorare anche in cantieri stretti. Ciascuna di queste macchine può essere utilizzata in applicazioni particolari grazie ad opportune modifiche apportate al sistema di locomozione e al sollevatore telescopico.

1.2 Problematiche legate alla stabilità

Per le macchine movimento terra, la stabilità è un argomento molto importante. Prendendo in esame i sollevatori telescopici, si hanno molti fattori che possono concorrere a renderli instabili. Situazioni di pericolo si possono verificare durante gli spostamenti su pendii con o senza la presenza di un carico. Le condizioni atmosferiche sfavorevoli, come la nebbia e la pioggia, potrebbero innescare scivolamenti, inoltre, se il carico dovesse offrire grandi superfici e l'estensione del braccio

dovesse raggiungere i limiti massimi, si creerebbe un effetto vela, che potrebbe provocare il ribaltamento della macchina a causa del vento. Se il terreno dovesse essere gelato o innevato, il mezzo potrebbe non rispondere più con precisione ai comandi direzionali impostati dall'operatore e, in presenza di molta neve, eventuali ostacoli potrebbero risultare nascosti. E' molto importante tener presente la natura del terreno perché, soprattutto in prossimità dei bordi dei fossi, delle scarpate, degli scavi, si possono verificare cedimenti del suolo dovuti al peso della macchina, alle vibrazioni che essa può trasmettere al terreno e all'effetto di rullatura dei pneumatici. E' fondamentale anche la procedura con cui si carica il materiale e la conoscenza da parte dell'operatore delle caratteristiche dello stesso, come la posizione del baricentro, in modo da evitarne l'instabilità durante il movimento del sollevatore. Infine, è importante conoscere i limiti della macchina in funzione del carico.

1.2.1 Sistemi di controllo della stabilità

Le varie case produttrici hanno reagito al problema della stabilità introducendo diversi sistemi di sicurezza. Innanzitutto, nelle cabine sono collocati dei diagrammi di carico che riportano il carico ammesso in funzione dell'angolo di sollevamento e dell'estensione del braccio. Sono specifici per ogni attrezzatura montata e sono riferiti alla macchina ferma su gomme o, se previsti, su stabilizzatori e permettono all'operatore di capire quale sia, di volta in volta, lo spazio di lavoro del veicolo, in funzione di un dato carico. Komatsu, come altre aziende, ha adottato un dispositivo di controllo della stabilità che, con allarme acustico e visivo, avverte l'operatore del progressivo avvicinarsi del limite di instabilità, qualora la configurazione del veicolo in fase operativa non dovesse essere quella ideale per la sicurezza. Inoltre, utilizza un sistema anti-ribaltamento che blocca automaticamente i movimenti aggravanti, consentendo solo il rientro degli sfilì del braccio. Per far sì che il braccio lavori sempre in un piano verticale, Komatsu offre la possibilità di dotare i propri mezzi di un sistema che consenta il livellamento trasversale del telaio con una inclinazione massima di $\pm 10^\circ$. Per garantire un corretto livellamento si utilizza una livella a bolla d'aria posta all'interno della cabina. Merlo permette la possibilità di disporre di sospensioni sul braccio telescopico o di sospensioni idropneumatiche attive a controllo elettronico sull'assale anteriore. Questi sistemi assicurano un'efficace azione di sospensione, indipendentemente dal carico, migliorando la dinamica del veicolo e, di riflesso, garantendo una maggiore stabilità. Le sospensioni attive utilizzano i cilindri idraulici del correttore di inclinazione trasversale, che rimane pienamente funzionante, operano grazie

all'integrazione omogenea ed equilibrata di un sistema di smorzamento idropneumatico con un dispositivo di controllo elettronico gestito da microprocessore. Il sistema di sospensioni sul braccio adotta smorzatori di pressione, operanti sul cilindro idraulico di sollevamento, i quali offrono un'efficace azione di ammortizzamento delle sollecitazioni, che vengono trasmesse al carico trasportato durante le fasi di lavoro. In generale, si cerca di ottenere un baricentro complessivo della macchina il più basso possibile proprio a vantaggio di una maggiore stabilità. Per quanto riguarda i sollevatori telescopici a cabina rotante, Manitou equipaggia i propri modelli con un limitatore di momento di carico in grado di memorizzare diagrammi specifici per ciascun accessorio montato, di analizzare il peso e la posizione del carico nello spazio e di individuare la configurazione di lavoro della macchina. Confronta l'insieme dei dati con i diagrammi di carico memorizzati e, in caso di sovraccarico, provoca l'interruzione automatica dei movimenti. Il sistema adottato da Merlo consiste in un computer, che acquisisce ed elabora in tempo reale le informazioni in entrata ed in uscita dai diversi gruppi funzionali della macchina. Le condizioni operative del veicolo sono costantemente monitorate sullo schermo ed in ogni istante è facile verificarne lo stato di funzionamento. Il computer di bordo genera automaticamente e 'dinamicamente' il diagramma di carico e limita, sempre in automatico, l'operatività della macchina in funzione della posizione del baricentro complessivo rispetto ai punti di stabilizzazione al suolo. Si può così operare in piena sicurezza in tutte le condizioni e con qualsiasi attrezzatura in uso. Inoltre, si può visualizzare in tempo reale sullo schermo del quadro strumenti, sia in forma numerica che grafica, la posizione e lo spostamento del baricentro stesso, seguendo il reale spostamento del carico durante le fasi di lavoro. Il sistema opera con qualunque estensione degli stabilizzatori e controlla con continuità la posizione del carico nello spazio e il suo peso. L'operatore può predeterminare l'area di lavoro impostando sul computer di bordo l'angolo di rotazione della torretta ed i limiti di sfilo e sollevamento del braccio.

Capitolo 2

Joystick a due gradi di libertà

Per comandare la macchina operatrice simulata è stato usato un joystick a due gradi di libertà (vedi 2.1). Su ciascun grado di libertà agisce un opportuno attuatore. I nostri due attuatori sono un motore elettrico in corrente continua (M-543-0900-0808-03-MBU) e un freno elettromagnetico, i quali vengono utilizzati per poter far percepire all'operatore che manovra il joystick gli opportuni ritorni di forza e per centrare correttamente la leva del joystick in condizioni di riposo. Il joystick a due gradi di libertà, utilizzato per l'azionamento della macchina operatrice simulata, presenta come attuatore per l'asse di rollio un motore elettrico in corrente continua, e per l'asse di beccheggio un freno elettromagnetico. Il motore è collegato in presa diretta alla leva del joystick attraverso una leva collegata all'asse del motore tramite un perno; il freno è collegato alla leva tramite un supporto rotante trascinato da questa tramite il contatto con due sbarrette laterali. Lo spazio di lavoro del joystick viene scelto pari a $\pm 60^\circ$ per l'asse di beccheggio e di $\pm 60^\circ$ per l'asse di rollio. Tutti gli elementi del joystick sono in alluminio Anticorodal (ad eccezione del perno di collegamento tra l'asta del joystick e l'asse di moto di rollio, che è in acciaio inossidabile).

2.1 Joystick

Il progetto di un joystick a due gradi di libertà, come di una qualsiasi altra interfaccia aptica, presenta delle difficoltà legate alla modellizzazione di un fenomeno difficilmente quantificabile come il tatto umano. Ciò è dovuto al fatto che l'operatore può sia ricevere stimoli dall'interfaccia sia agire su di essa. Si è dovuto tenere conto quindi nella progettazione del joystick delle seguenti problematiche:

- la percezione di forze in condizioni quasi-statiche e dinamiche

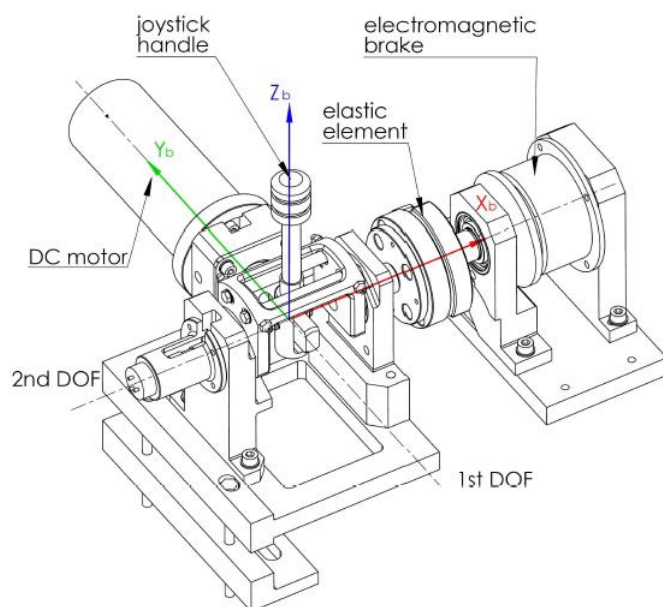


Figura 2.1: Joystick a due gradi di libertà



Figura 2.2: Joystick realizzato

- la pressione percepita
- la risoluzione con cui si riesce a valutare la forza e la posizione
- il livello di rigidità necessario per degli stimoli rigidi (eventuali muri virtuali)

Nel caso del joystick risulta quindi fondamentale individuare le seguenti caratteristiche della mano:

- la massima forza che può essere controllabile
- la precisione con cui si può controllare la forza sulla mano
- la banda passante della forza

Si possono considerare anche altri parametri, ma essi sono marginali rispetto a quelli appena elencati.

2.1.1 Percezione della forza

Affinché l'operatore possa percepire una forza che varia lentamente nel tempo in modo progressivo, bisogna che la risoluzione del sistema a ritorno di forza sia uguale o superiore di quella percepibile dell'operatore stesso. La minima differenza percepibile (Just-Noticeable-Difference o JND) è attorno al 7% indipendentemente dalle condizioni di test, dalle parti del corpo stimulate e dalle forze di riferimento (da 2.5 a 10 N o da 25 a 410 N). Uno dei fattori che provoca più disturbi in un sistema a ritorno di forza è il livello delle vibrazioni indesiderate. Un elevato livello di vibrazioni può velocemente deteriorare la sensazione di moto in ambiente libero o la percezione di un muro virtuale. In base alla letteratura, la soglia oltre cui si percepiscono le vibrazioni è all'incirca di 28 dB sotto i 30 Hz, diminuisce di 12 dB/oct dai 30 ai 300 Hz e quindi risale nuovamente. Questo risulta essere un limite molto stretto nella progettazione dell'hardware e del controllo del sistema.

2.1.2 Risoluzione di posizione

La risoluzione di posizione con cui si deve poter valutare lo stato del sistema dipende da quella che l'utilizzatore del sistema riesce a raggiungere. Solitamente la risoluzione minima che bisogna ottenere dal joystick è di circa 2 – 2.5°.

2.1.3 Rigidezza

Il comportamento meccanico di molti muri virtuali è simulato con delle rigidezze elastiche. Il problema è determinare qual è la rigidezza affinché un muro possa effettivamente essere definito come tale. Studi fatti in questo campo hanno portato a definire tre “parametri” per valutare la rigidezza di un muro: la sensazione provata nel contatto iniziale, la rigidezza che il muro offre e la “pulizia” nel distacco dal muro. Benché sia universalmente accettato che non vi sarà mai una somiglianza tra un muro vero ed uno virtuale per ovvi problemi di natura meccanica, solitamente si prende in considerazione la rigidezza del sistema come uno dei parametri di valutazione del dispositivo.

2.1.4 Controllo della forza

Per quanto riguarda l'intervallo di forze esercitabili si deve innanzitutto dire che per sfruttare appieno le potenzialità della mano, bisogna che la forza massima esercitabile dal sistema sia uguale o maggiore di quella che l'operatore può produrre. Nella letteratura non sono presenti molte informazioni riguardo tale forza, sono stati comunque scelti come limiti 10 N per il rollio e 40 N per il beccheggio. La differenza tra le due forze per i due assi del moto è collegata al fatto che la forza prodotta per il rollio viene generata dalla rotazione del polso, mentre quella per il beccheggio è dovuta al movimento della spalla e del gomito. Per quanto riguarda la banda passante, c'è da osservare che vi è molta differenza tra quella della forza controllabile e quella della forza percepibile. Se infatti gli stimoli tattili possono essere percepiti fino a 1000 Hz, il limite superiore della banda passante della forza controllabile è di appena 20 — 30 Hz. Secondo alcuni studi, la banda passante è di soli 7 Hz (Brooks, 1990). Si decide perciò di avere un sistema la cui banda passante della forza sia superiore ai 20 Hz.

2.2 Asse di rollio

Come attuatore per l'asse di rollio si è scelto di usare un motore elettrico in corrente continua collegato in presa diretta con la leva del joystick. Il motore è stato usato sia per il centraggio della leva che per il ritorno di forza all'operatore. L'uso di motoriduttori, per ridurre i costi del motore, fa sì che l'inerzia percepita dall'utilizzatore del sistema risulti moltiplicata per 2N se N è il rapporto di riduzione. Il valore del rapporto di riduzione nei joystick commerciali varia da 4 a 7 (e quindi l'inerzia del motore risulta da 16 a quasi 50 volte maggiore). Questo

Coppia di stallo continua $[N \cdot m]$	0.40
Coppia di picco $[N \cdot m]$	1.44
Massima corrente continua $[A]$	4.7
Massima corrente di picco $[A]$	16.7
Tensione massima applicabile $[V]$	60
Velocità massima $[RPM]$	6000
Momento di inerzia del rotore $[Kg \cdot m^2]$	$5.3 \cdot 10^{-5}$
Massa del motore $[Kg]$	1.6
Costante di coppia - K_T $\left[\frac{N \cdot m}{A}\right]$	0.086
Costante di tensione - K_V $\left[\frac{V}{kRPM}\right]$	9
Resistenza ai terminali $[\Omega]$	1.5
Induttanza ai terminali $[mH]$	2.4

Tabella 2.1: Caratteristiche del motore

significa che l'inerzia all'operatore risulterà necessariamente elevata ed il comportamento dinamico del sistema di attuazione sarà critico per le prestazioni del sistema. Inoltre questi sistemi di riduzione presentano necessariamente dei giochi che sono una delle cause principali del crollo della risposta del sistema anche alle basse frequenze (15–30 Hz, dove la sensibilità cinetico-percettiva della mano è approssimativamente 25 Hz). Un altro dei maggiori problemi presenti nei joystick è il backlash generato dalla presenza di treni di ruote, pulegge e chiavette come elementi di collegamento tra gli attuatori meccanici e gli alberi dei due assi del moto. E per tutti questi motivi, si è deciso di escludere l'uso di riduttori per contenere le dimensioni del sistema. Per poter contenere le dimensioni del motore, l'unico altro parametro su cui si può agire è la lunghezza dell'asta del joystick. A livello commerciale, le dimensioni delle aste variano da un minimo di 100 mm fino a 200 mm. Una volta considerato che all'aumentare della lunghezza della leva aumenta la coppia continua che deve poter erogare il motore, ed all'aumentare della coppia aumentano le sue dimensioni, si sceglie di realizzare un joystick il cui centro di rotazione disti 100 mm dall'impugnatura per l'operatore. Questo fa in modo che la coppia continua che il motore deve erogare sia di 1 Nm. L'utilizzo di un motore a corrente continua risulta comunque essere il giusto compromesso qualità/prezzo con il vincolo di avere una coppia continua inferiore a quella prefissata in sede di progetto. Il motore elettrico scelto è il M-543-0900- 0808-03-MBU della MAE le cui caratteristiche si possono vedere in tabella 2.1

Il nuovo valore di forza continua ottenibile per il rollio risulta essere di 4 N.

Il valore di picco è di 14.4 N, superiore al valore di progetto. Tuttavia si nota che questo è ottenibile solo per brevi periodi quindi è necessario un compromesso. Il controllo della coppia applicata alla leva del joystick verrà effettuato tramite il controllo della corrente imposta ai motori dai driver di alimentazione in quanto vi è una proporzionalità diretta tra corrente assorbita e coppia esercitata dai motori in corrente continua. La lettura della posizione dell'asse di rollio viene fatta da un encoder di tipo incrementale a 2000 impulsi/giro fatto lavorare in quadratura quadrupla (8000 impulsi giro). Si ottiene così $360^\circ/8000 = 0,045^\circ$ di risoluzione, decisamente inferiore ai $2 - 2,5^\circ$ della percezione umana.

2.3 Asse di beccheggio

Come attuatore per l'asse di beccheggio è stato scelto di usare un freno elettromagnetico power-off a molla. In questa versione semplificata del simulatore viene tenuto conto marginalmente del freno usandolo solamente per il centraggio della leva del joystick per l'asse di beccheggio. Su tale asse è presente inoltre un potenziometro rotativo di precisione in plastica conduttiva da 10k monogiro alimentato con 10 V stabilizzati. Tra il potenziometro e l'asse è interposto un giunto elastico che serve a compensare disallineamenti e rotazioni dovuti ad errori nella realizzazione dei diversi componenti. In questo modo le coppie su assi diversi a quelli di rotazione dell'albero non vanno a scaricarsi sul potenziometro e non ne danneggiano i componenti. Considerando che il convertitore A/D che verrà ad esso collegato è a 8 bit, si ha che la risoluzione che si ottiene con il potenziometro monogiro ammonta a $0,23^\circ$, migliore di quella minima richiesta.

2.3.1 Freno elettromagnetico on-off

I freni elettromagnetici on-off si dividono in due principali categorie: power-on brakes e power-off brakes. Nel primo caso la coppia di frenata è esercitata quando viene fornita l'alimentazione alla bobina di eccitazione del freno; nel secondo caso il freno entra in funzione quando viene a mancare la tensione di alimentazione. Una seconda distinzione può essere fatta in base al principio di funzionamento dei freni: freni elettromagnetici a molla e freni elettromagnetici a magnete permanente.

I freni elettromagnetici a molla presentano generalmente le seguenti caratteristiche:

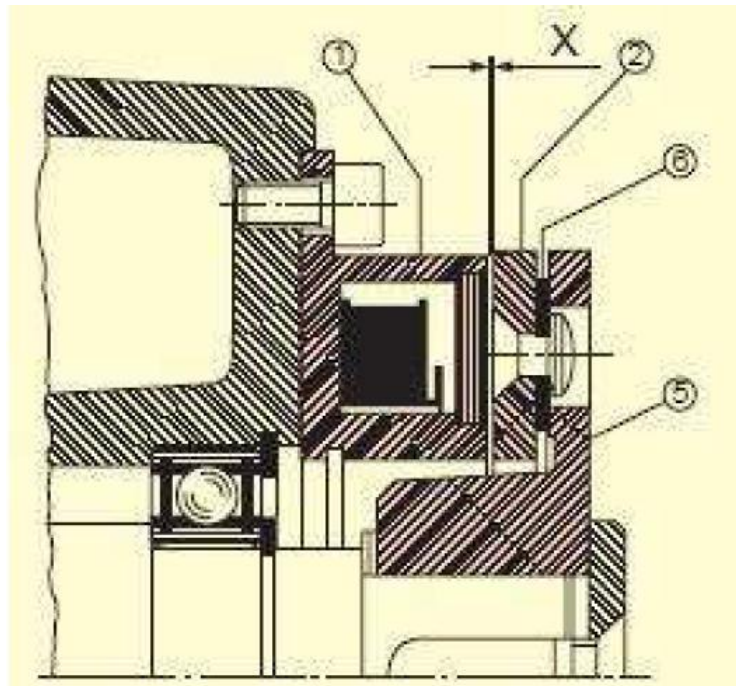


Figura 2.3: Freno elettromagnetico

- superficie di frenatura in ferro senza amianto, resistente all'usura ed alle alte temperature
- durata pressochè illimitata
- classe di isolamento B
- esente da giochi torsionali
- elevata affidabilità
- bassa rumorosità
- tempi di commutazione brevi
- assenza di coppia residua
- montaggio semplice

Come si può vedere in figura 2.3 ,alimentando con corrente continua (standard 24 VDC), l'indotto (2) é attratto dalla forza del campo magnetico verso il magnete (1). Si ottiene così un bloccaggio per frizione. Quando viene tolta la corrente, indipendentemente dalla posizione di montaggio, tramite la molla piana (6) si ottiene la separazione delle superfici ed il ripristino del gap (X). I freni

elettromagnetici a magneti permanente con funzionamento a secco presentano generalmente i seguenti vantaggi:

- tensione standard 24 VDC
- incremento del massimo traferro rispetto a quelli a molla
- maggior area di sgancio ($24\text{ VDC} \pm 5\text{ }10\%$) con temperatura di funzionamento fino a 100°C
- isolamento classe F
- incremento della coppia del 50% rispetto a quelli a molla
- assenza di magnetismo residuo
- elevato rapporto coppia/dimensioni
- coppia elevata anche alle alte temperature grazie ai magneti permanenti
- durata illimitata

In assenza di corrente l'indotto viene attratto dalla forza del campo magnetico generato dai magneti permanenti verso la superficie di frizione. In questo modo si ottiene un bloccaggio per attrito senza gioco. Dando tensione alla bobina si crea un campo magnetico uguale e contrario a quello prodotto dai magneti permanenti che risulta così neutralizzato. C'è da osservare che le parti della macchina, costruite in materiale magnetico, se poste nelle immediate vicinanze del freno possono ridurre la coppia e quindi può rendersi necessario variare la tensione di alimentazione per la magnetizzazione.

2.3.2 Molle di compressione

L'utilizzo delle molle di compressione è necessario per l'introduzione di una certa elasticità sulla leva anche quando il freno è bloccato. Ciò serve ad evitare l'urto dovuto alla chiusura del freno per poter lasciare un certo movimento alla leva anche quando il freno è bloccato. La presenza di quattro molle precomprese garantisce una forza sempre lineare rispetto alla rotazione durante il movimento della leva contro le molle per mantenere costante la rigidità percepita dall'operatore anche nelle inversioni di rotazione. Per fare questo si utilizzano due dischi (quello lato joystick denominato "disco mobile", mentre l'altro denominato "disco fisso"). Il disco mobile presenta due denti che vengono inseriti negli scavi del disco

fisso. Sempre in questi scavi, sono posizionate quattro molle lineari di compressione ad estremità chiuse precomprese. Quando il freno viene alimentato, il disco fisso segue il disco mobile con un leggero ritardo, dovuto ad effetti dinamici e di rigidità non eccessiva delle molle. Tolta l'alimentazione al freno (che si ricorda essere power-off), il disco fisso è bloccato ed ogni rotazione di beccheggio porta alla deformazione delle molle (due si comprimono ulteriormente mentre due si estendono) con la conseguente percezione da parte dell'operatore di una forza resistente proporzionale all'angolo di rotazione. Ovviamente tali molle presentano il problema del compattamento delle spire quando vengono eccessivamente compresse. Tale situazione non si viene a creare perché il freno elettromagnetico scelto è in grado di sopportare una coppia inferiore a quella necessaria a portare le molle a compattamento. La massima resistenza esercitabile è quindi definita dal freno ed è pari a 3,95 Nm. Tutti gli elementi sono in alluminio Anticorodal così da incrementare quelle che sono le frequenze naturali del joystick. La rigidità di ciascuna molla è scelta in modo tale da ottenere una rigidità torsionale equivalente di 201 mNm/°, equivalente ad una rotazione di circa 5° ogni 10 N applicati all'estremità della leva del joystick.

Capitolo 3

Schemi di controllo Simulink

Gli schemi di controllo della stabilità della macchina sono stati sviluppati in ambiente Simulink in modo da ottenere un sistema che potesse lavorare in real-time. In particolare si è fatto riferimento al sollevatore telescopico frontale modello WH714 prodotto da Komatsu, già descritto nel capitolo 1. Poiché questa macchina non ha una torretta girevole, i movimenti del braccio telescopico possono essere comandati completamente utilizzando il joystick a 2 GDL descritto nel capitolo 2 (l'angolo di inclinazione delle forche è infatti calcolato in modo automatico per mantenere sempre orizzontale il piano di appoggio del carico). In questa configurazione la posizione del baricentro della macchina può solo traslare lungo l'asse longitudinale della stessa, quindi, poiché il braccio telescopico ha un'inclinazione massima inferiore a 90° , deriva che è sufficiente considerare solo la coordinata X del limite anteriore del poligono di appoggio per valutare la stabilità dell'intero sistema.

3.1 Layout del sistema di simulazione

In figura 3.1 è mostrata la postazione di lavoro che è stata creata per sviluppare i sistemi di controllo di stabilità del sollevatore telescopico. Sedendo nella postazione di lavoro l'operatore ha di fronte lo schermo del computer sul quale è mostrata la macchina in movimento e i target che devono essere raggiunti durante le varie fasi di test. Per comandare il movimento del sistema si agisce sul joystick a due gradi di libertà posto sulla destra, tramite di esso è possibile comandare l'angolo di alzata del braccio e la sua estensione. Il sistema di controllo della stabilità è invece in esecuzione su un secondo computer, la comunicazione tra i due PC avviene tramite connessione LAN, mentre il controllo del joystick è realizzato tramite una scheda di acquisizione collegata al quadro elettrico che

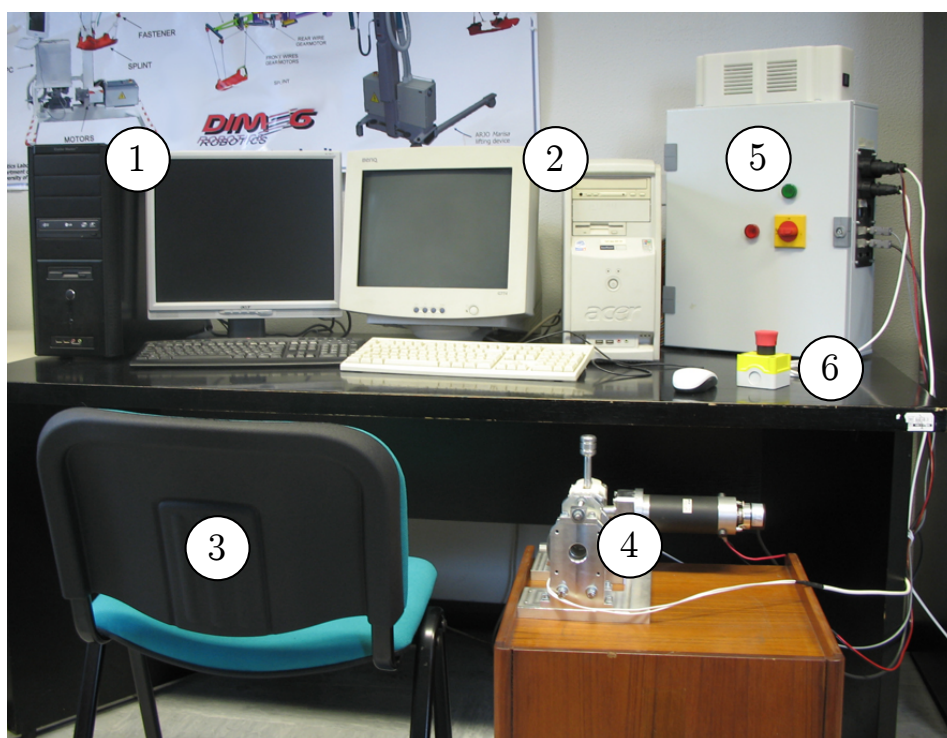


Figura 3.1: Postazione di lavoro utilizzata per sviluppare il sistema e realizzare i primi test. In figura è possibile vedere il computer che si occupa di visualizzare in forma visiva il sollevatore (1), il computer che gestisce gli schemi di controllo del joystick (2), la postazione dell'operatore (3), il joystick a 2 GDL (4), il quadro elettrico (5) e il pulsante di emergenza (6).

si occupa di gestire l'alimentazione agli azionamenti e leggere la posizione della leva impugnata dall'operatore.

Qui di seguito sono descritti con maggiore dettaglio i vari sottosistemi che compongono la postazione di lavoro, ad esclusione del joystick che è stato già descritto nel capitolo 2.

3.1.1 Postazioni PC

Simulatore

Il computer che si occupa di visualizzare il movimenti della macchina utilizza il modello cinematico completo, avente come ingresso i movimenti imposti dall'operatore tramite il joystick, che sono acquisiti dal computer che si occupa di eseguire lo schema di controllo del sistema anti-ribaltamento. Il software che calcola la cinematica del veicolo e si occupa della sua visualizzazione è stato scritto in ambiente Matlab (in particolare è stata usata la versione R2007b). La trasmis-

sione delle corse dei cilindri di estensione e di sollevamento dal computer a cui è collegato il joystick a quello che esegue il simulatore è fatta sfruttando il protocollo UDP, gestito in ambiente Matlab tramite la libreria “Pnet” ¹

La scelta del protocollo UDP invece che il TCP è dovuta al fatto che questo protocollo è più rapido ed efficiente quando lo si usa per applicazioni “real time” che richiedono una frequenza minima di spedizione delle informazioni e non possono ritardare eccessivamente la trasmissione dei pacchetti, anche se possono tollerare qualche perdita di dati. Per contro però questo protocollo non gestisce il riordinamento dei pacchetti né la ritrasmissione di quelli persi, quindi tra i dati spediti è stato inserito un numero progressivo che consente di verificare l’ordine dei pacchetti ricevuti, in modo da utilizzare solo quelli che portano le informazioni più recenti e scartare quindi quelli che portano valori appartenenti ad istanti di tempo precedenti all’ultimo pacchetto ricevuto.

¹ Il toolbox TCP/UDP/IP, la cui funzione principale è denominata “pnet”, consente di creare connessioni TCP/IP o ricevere/inviare pacchetti UDP/IP in ambiente Matlab. Può quindi essere utilizzato per trasmettere dati su rete internet o intranet tra diversi processi Matlab oppure con altre applicazioni. Le funzioni di questo toolbox consentono infatti di creare una postazione server o client per trasmettere stringhe di testo, array o altro tipologie di variabili supportate da Matlab.

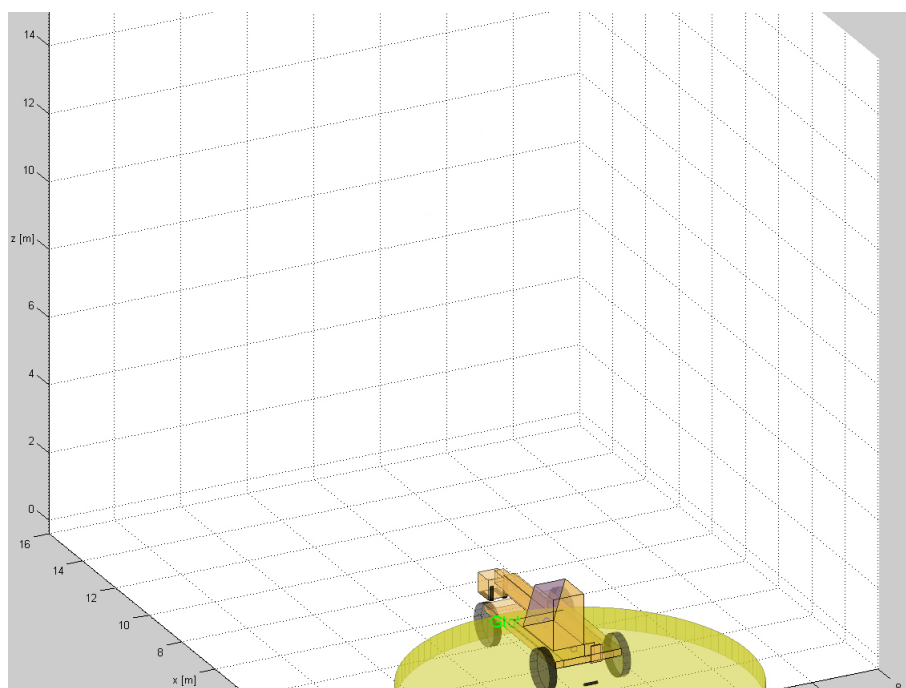


Figura 3.2: Interfaccia grafica che mostra il sollevatore telescopico con il braccio abbassato e ritratto.

In figura 3.2 è visibile l'interfaccia grafica che viene presentata all'operatore seduto nella postazione di comando all'avvio del simulatore. Per avere una visuale il simile a quella che si ha durante l'utilizzo del mezzo reale è stata scelta una orientazione della vista in prospettiva, con il punto di osservazione posto dietro al sollevatore.

Controllo

Il controllo di stabilità vero e proprio è stato sviluppato nell'ambiente Simulink di Matlab (anche in questo caso è stata usata la versione R2007b). Come si è già detto parlando del simulatore, la comunicazione tra i due sistemi avviene sfruttando il protocollo UDP, in questo caso Simulink fornisce già le librerie necessarie per gestire questo tipo di comunicazione tramite blocco *Packet Output* contenuto nella libreria *Real Time Windows Target*. Per poter funzionare, in questo blocco deve essere specificato l'indirizzo IP e la porta del computer al quale devono essere trasmessi i pacchetti e inoltre si deve indicare il tempo di campionamento dei dati che devono essere spediti, nonché la loro dimensione e tipologia (per questo progetto sono stati utilizzati tutte variabili di tipo double, che sono composte da 8 byte ciascuna, quindi poiché i parametri inviati sono 17 la dimensione complessiva del pacchetto di dati è di 136 byte), come si può vedere in figura 3.3.

L'acquisizione dell'angolo di inclinazione della leva del joystick lungo i due GDL di rollio e beccheggio è fatta eseguendo la lettura dei relativi canali di una scheda di acquisizione Sensoray 626. In particolare, l'angolo di rollio della leva (che comanda l'attuatore di sollevamento) è misurato da un potenziometro rotativo e quindi genera un segnale di tensione, mentre l'angolo di beccheggio (che comanda l'attuatore di estensione) è misurato da un encoder incrementale e quindi genera due segnali relativi ai canali (a) e (b).

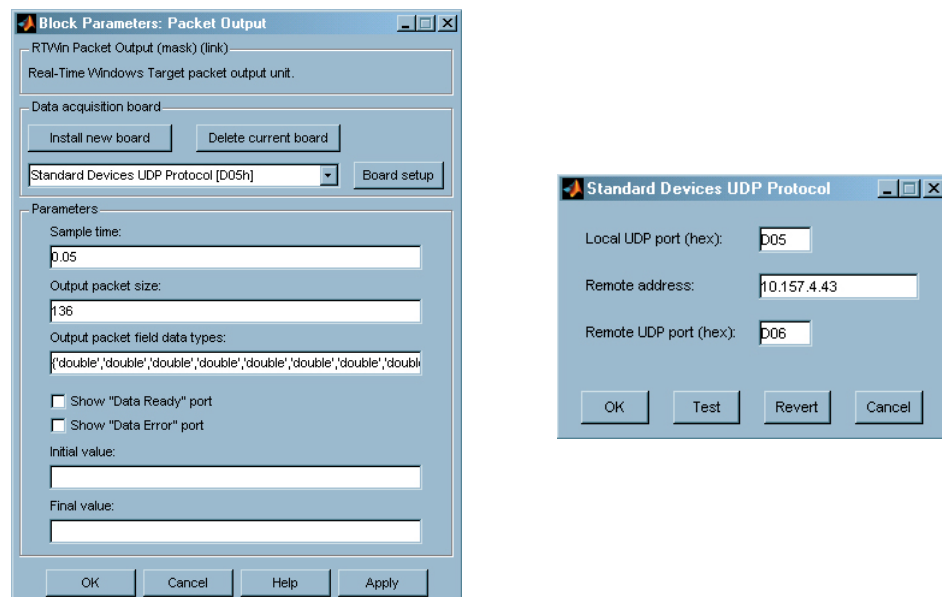
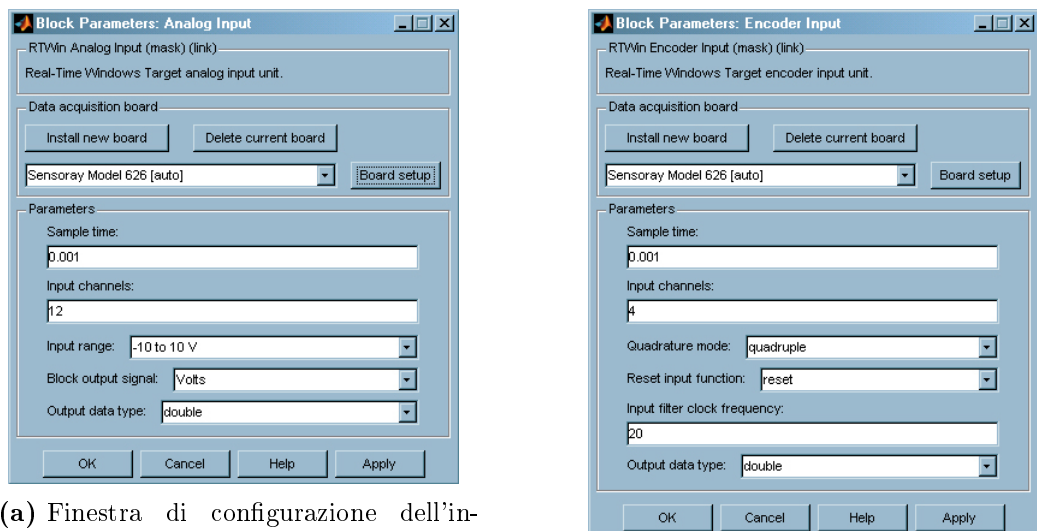


Figura 3.3: Impostazioni del blocco *Packet Output* utilizzato per trasmettere i dati dal programma di controllo al programma di simulazione.



(a) Finestra di configurazione dell'ingresso analogico collegato al potenziometro di misura dell'angolo di rollio.

(b) Finestra di configurazione dell'ingresso encoder collegato al sensore di misura dell'angolo di beccheggio.

Figura 3.4: Impostazione dei blocchi per la lettura dei trasduttori di rotazione montati sui 2 GDL del joystick.

Per la lettura del segnale di tensione si sfrutta quindi uno dei moduli ADC della scheda di acquisizione, accessibile da Simulink tramite il blocco *Analog Input* della libreria *Real Time Windows Target*. In figura 3.4a è riportata la finestra di configurazione di questo ingresso, dove deve essere specificato il numero del canale ADC a cui è collegato il sensore, il tempo di campionamento e il range di variazione del segnale in ingresso. Il segnale generato dall'encoder viene invece gestito direttamente da un modulo apposito della scheda Sensoray 626, quindi, come mostrato in figura 3.4b, per ottenere la misura dell'angolo della leva è sufficiente indicare il numero del canale a cui è collegato l'encoder, il tempo di campionamento del contatore collegato al segnale dell'encoder, la strategia di decodifica del segnale encoder e la frequenza di taglio del filtro passabasso presente sulla scheda, che consente di limitare l'influenza di eventuale disturbi sui cavi di collegamento con il sensore.

3.2 Modello degli azionamenti del sollevatore

In un sollevatore telescopico reale gli azionamenti sono di tipo idraulico, l'operatore agendo sul joystick comanda quindi ,direttamente o indirettamente, l'apertura delle valvole di controllo che regolano la portata d'olio inviata ai cilindri della macchina. Il controllo che viene a realizzarsi è quindi fondamentalmente un controllo di velocità degli attuatori. Questa relazione è stata modellizzata con il sistema di figura 3.5, dove la velocità imposta dall'operatore tramite il joystick passa prima attraverso un blocco saturatore, necessario per tener conto della portata d'olio massima (e quindi della velocità massima di allungamento dei cilindri) che la macchina è in grado di fornire, e poi entra in un blocco integratore. Questo blocco riesce quindi a riprodurre la variazione di lunghezza degli attuatori in funzione della portata d'olio in ingresso. È inoltre possibile impostare un limite di saturazione inferiore e superiore per fare in modo che la lunghezza dei cilindri possa variare da 0 m al valore di corsa massimo. I blocchi integratori hanno inoltre un ulteriore ingresso che permette di azzerare il valore della corsa dei cilindri quando si esegue il reset del sistema.

Sebbene questo schema risulti essere semplificato rispetto al comportamento reale dell'impianto idraulico (non si considerano infatti i ritardi nella trasmissione della pressione idraulica, i fenomeni di attrito nei cilindri, le oscillazioni del braccio,...), esso risulta essere sufficiente per modellizzare il comportamento della macchina rispetto agli schemi di controllo della stabilità che sono stati sviluppati, che si basano su un modello del sollevatore di tipo statico. In questi primi test

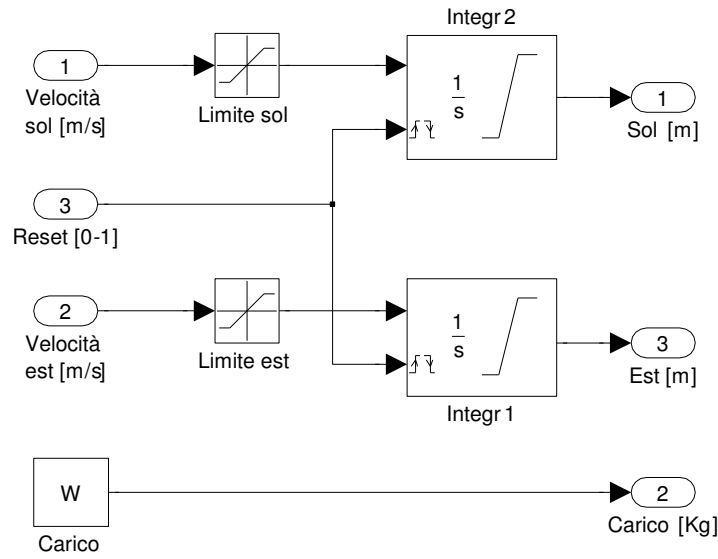


Figura 3.5: Sottosistema che simula il comportamento degli azionamenti idraulici del sollevatore telescopico.

infatti non si considerano gli effetti d'inerzia/derivanti dal movimento del sollevatore.

In questo sottosistema è inserita inoltre l'informazione del carico applicato alle forche del sollevatore.

3.3 Calibrazione del joystick

Per poter compensare le inevitabili discordanze tra il modello teorico del joystick e il sistema realmente costruito è stata definita una procedura di calibrazione iniziale che permette di acquisire i limiti dello spazio di lavoro della leva e quindi calcolare i parametri di offset e scala per far coincidere la corsa meccanica effettiva con la corsa teorica utilizzata per il comando della macchina. Andando infatti a leggere direttamente il sensore di beccheggio e di rollio e azzerandoli ad esempio quando la leva si trova in posizione verticale, si ha che spostando la leva percorrendo i limiti della corsa utile, si genera il grafico riportato in figura 3.6, quando invece a livello teorico si dovrebbe ottenere un tracciato rettangolare ².

²Questa discordanza tra modello teorico e sistema reale è probabilmente dovuta, per la maggior parte, ad un non perfetto incrocio tra l'asse della leva del joystick, l'asse dell'azionamento passivo e l'asse dell'azionamento attivo.

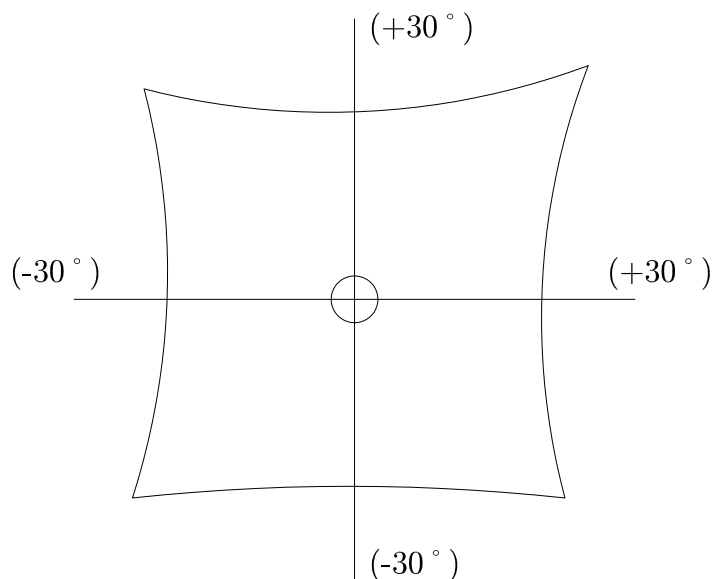


Figura 3.6: Area di lavoro della leva del joystick prima della procedura di calibrazione.

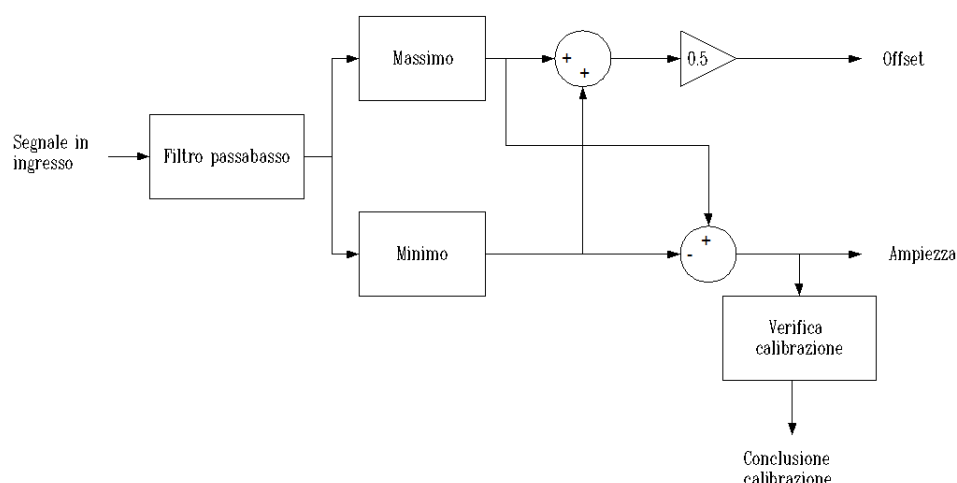


Figura 3.7: Schematizzazione della procedura di calibrazione per la lettura della rotazione della leva sull'asse di beccheggio e sull'asse di rollio.

La metodologia di calibrazione è simile per entrambi gli assi e si basa sullo schema descritto nel diagramma di figura 3.7. L'utente, una volta acceso il sistema, ha il compito di muovere la leva del joystick lungo tutto il perimetro dell'area di lavoro permesso, in questo modo il segnale acquisito, opportunamente filtrato per ridurre i disturbi a frequenza maggiore di 1.6 Hz per l'asse di rollio e 16 Hz per l'asse di beccheggio³, può essere monitorato per ricavare il suoi val-

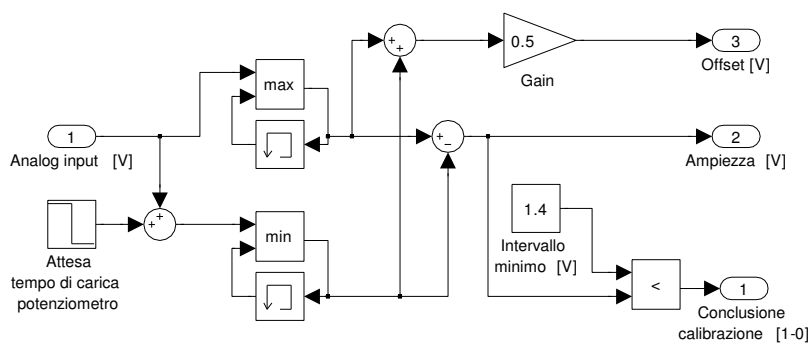
³La frequenza di taglio per un filtro passa basso del primo ordine descritto dalla funzione di trasferimento $F(s) = \frac{k}{s+\omega_0}$ è data da $f_{taglio} = \frac{\omega_0}{2\pi}$ mentre l'amplificazione all'interno della

ori massimi e minimi tra quelli acquisiti durante il movimento svolto dall'utente. Questi valori consentono quindi di calcolare l'ampiezza massima dello spazio di lavoro e il suo valore di mezzo, detto offset perché viene poi utilizzato come valore da sottrarre al segnale per fare in modo che questo assuma il valore 0 quando la leva si trova al centro dell'area di lavoro. I valori di ampiezza e offset vengono continuamente ricalcolati durante la procedura di calibrazione e una volta che l'ampiezza supera un certo valore viene segnalato che il procedimento ha raggiunto dei valori sufficienti per il funzionamento del sistema e che quindi la calibrazione dello spazio di lavoro può essere considerata conclusa. In realtà questo procedimento di calcolo dei valori di ampiezza e offset continua anche durante l'utilizzo del joystick, quindi questi valori vengono aggiornati anche durante il normale utilizzo del sistema, in modo da estendere l'area di lavoro su tutto lo spazio effettivamente disponibile.

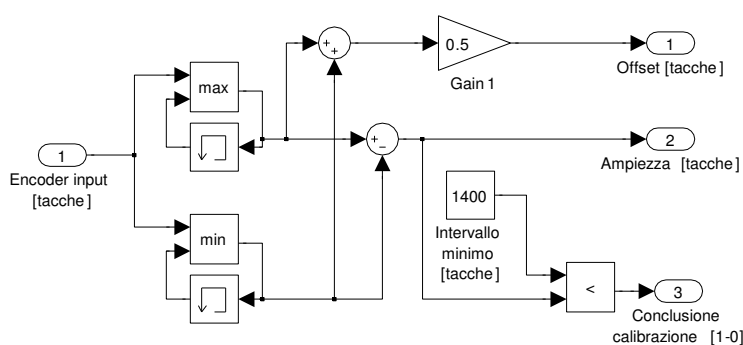
In figura 3.8a è riportato lo schema utilizzato per la calibrazione del potenziometro, mentre in figura 3.8b lo schema per la calibrazione dell'encoder. Per quanto riguarda il potenziometro, rispetto allo schema di figura 3.7, per il calcolo del valore minimo è stato inserito un segnale che passa da un valore iniziale pari a 2, ad un valore nullo dopo 0.1 s. Ciò deriva dal fatto che, poiché il segnale generato dal potenziometro è di tipo analogico, esso risente dei transitori che si hanno all'accensione del sistema, se quindi la lettura del valore di tensione è fatta troppo in anticipo, si potrebbe leggere un valore eccessivamente basso a causa del fatto che la tensione di alimentazione del sensore non ha ancora raggiunto il valore stabile di regime. Poiché però questi transitori sono molto brevi, è sufficiente un'attesa di qualche decimo di secondo per ottenere un valore corretto.

Una volta terminata la procedura di calibrazione dell'area di lavoro della leva è possibile individuare l'area rettangolare indicata con la lettera A mostrata in figura 3.9 e il centro dello spazio di lavoro. Come si può vedere l'area comprende dei tratti che non sono effettivamente raggiungibili, quindi sperimentalmente sono stati individuati due coefficienti, uno per l'angolo di rollio e uno per l'angolo di beccheggio, che consentono di restringere l'area per individuare uno spazio rettangolare che include solo i punti effettivamente raggiungibili, indicato con la lettera B.

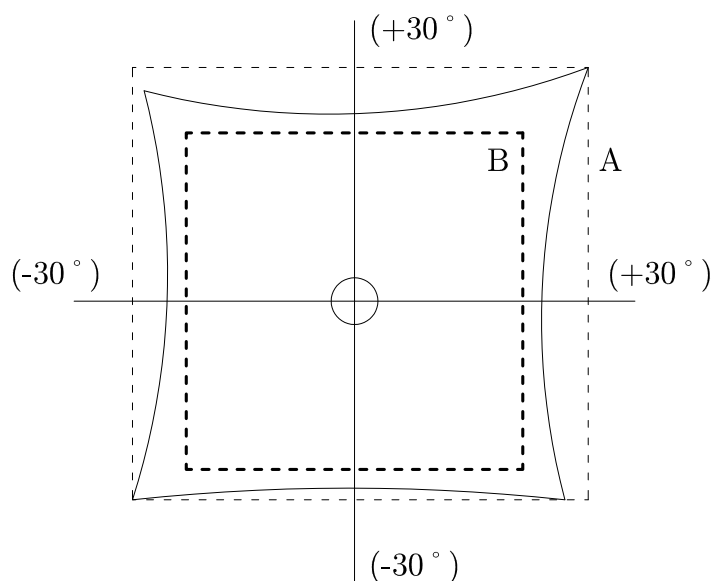
banda passante è $A_0 = \frac{k}{\omega_0}$. Per l'asse collegato al potenziometro si è considerata una frequenza di taglio minore perché questo strumento di misura genera disturbi maggiori rispetto al segnale letto dall'encoder, che è già stato condizionato dalla scheda di acquisizione.



(a) Calibrazione dell'asse di rollio.



(b) Calibrazione dell'asse di beccheggio.

Figura 3.8: Schemi di calibrazione del potenziometro 3.8a e dell'encoder 3.8b.**Figura 3.9:** Area di lavoro della leva del joystick con evidenziati i limiti individuati tramite la procedura di calibrazione (A = limiti massimi dell'area di lavoro, B = area di lavoro effettiva).

Questi coefficienti moltiplicativi valgono rispettivamente 0.99 per l'angolo di rollio e 0.89 per l'angolo di beccheggio; questa differenza è dovuta alla struttura meccanica del joystick.

Conoscendo il valore di offset è quindi possibile sottrarlo alla misura dell'angolo (di beccheggio o di rollio) per ottenere un parametro che assume il valore nullo quando la leva è in posizione verticale. Dividendo quindi poi questo valore per l'ampiezza dell'area corretta secondo il fattore moltiplicativo di correzione si ottiene un numero che assume il valore di ± 0.5 per posizioni della leva che stanno sul bordo dell'area di lavoro, è quindi poi sufficiente utilizzare un blocco saturatore per escludere i valori che sono esterni all'area di lavoro rettangolare B individuata con la calibrazione. Vale infatti la proporzione

$$\frac{Misura}{Range_{misura}} = \frac{Misura_{corretta}}{Range_{desiderato}}$$

da cui si ottiene

$$Misura_{corretta} = Range_{desiderato} \cdot \frac{Misura}{Range_{misura}}$$

dove $Range_{desiderato} = 1$, mentre $Range_{misura} = Range_{reale} \cdot coeff_{correttivo}$. Se $Misura$ fosse sempre contenuto nel $Range_{misura}$ anche $Misura_{corretta}$ sarebbe sempre contenuto in $Range_{desiderato}$, in realtà per come è stato costruito lo spazio di lavoro B, si possono avere delle misure che escono da questo intervallo, e quindi dei valori di $Misura_{corretta}$ che escono dal $Range_{desiderato}$, è quindi necessario un blocco saturatore per eliminare questi valori non voluti. Il valore in uscita dai blocchi saturatori viene poi moltiplicato per 60, in modo che gli angoli di beccheggio siano sempre compresi tra -30° e $+30^\circ$.

Prima di poter utilizzare il joystick l'utente deve portare la leva in posizione di partenza, che per l'asse di rollio comporta di bloccare la leva nella posizione di zero, almeno per gli schemi che sono stati fin qui testati, come descritto in 3.5 (per quanto riguarda invece l'asse di beccheggio la posizione iniziale della leva a cui corrisponde un comando di estensione nullo dipende dallo schema di controllo adottato). Il riconoscimento di questa condizione si basa sulla verifica che la leva si trovi effettivamente ad assumere un angolo di rollio nullo (con una tolleranza di $\pm 0.05^\circ$) e che questa posizione venga raggiunta con una velocità sufficientemente bassa (con una tolleranza di $\pm 30 \frac{^\circ}{s}$). Questa seconda condizione deriva dal fatto che in questi test sul joystick è montato il freno elettromagnetico che, per come visto nel paragrafo 3.10, ha tempi di disinserzione abbastanza lunghi, che potrebbero facilmente portare a bloccare il freno al di fuori della tolleranza di posizione desiderata. Lo schema che implementa questo controllo è

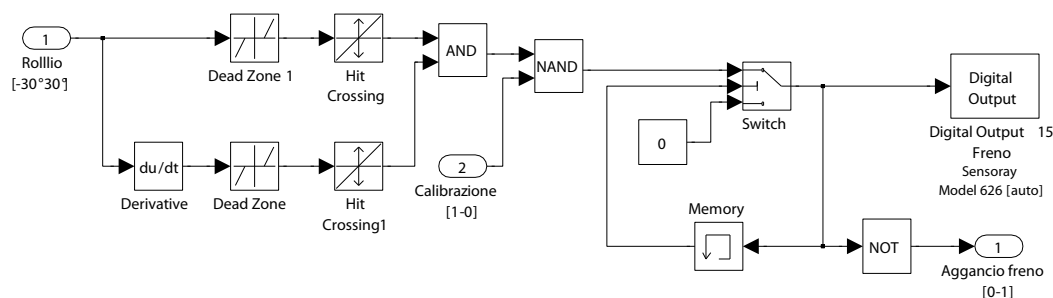


Figura 3.10: Schema che comanda l'attivazione del freno on/off che conclude la procedura di calibrazione del joystick.

riportato in figura 3.10, dove oltre alla condizione sulla velocità e posizione della leva, si ha che il freno viene diseccitato (e quindi la leva bloccata) solo se anche la procedura di calibrazione dell'area di lavoro è stata completata, la tabella di verità del blocco NAND è infatti

	0	1
0	1	1
1	1	0

Lo switch collegato al blocco NAND è impostato in modo che venga passato il valore sull'ingresso 1 se il valore presente all'ingresso 2 è maggiore o uguale ad 1, altrimenti viene passato il valore presente sulla porta 3. Il valore iniziale del blocco di memoria è invece impostato ad 1. All'avvio del software e durante la fase di calibrazione si ha quindi l'ingresso 2 del blocco di switch è pari ad 1, quindi in freno rimane eccitato e quindi la leva è libera di muoversi. Al completamento della fase di calibrazione e al verificarsi delle condizioni sulla posizione e velocità della leva sull'asse di rollio il blocco NAND assume il valore 0 quindi il freno viene disattivato (e quindi la leva bloccata) impostando a 0 l'uscita digitale corrispondente. Nel contempo il blocco di memoria assume il valore 0, quindi allo step successivo, non essendo più verificata la condizione del blocco di switch, questo passa all'uscita il valore presente all'ingresso 3, cioè 0.

Con la conclusione della procedura di calibrazione e di blocco dell'asse di beccheggio nella posizione di zero si ha che le rotazioni della leva, prima mantenute a 0 dai blocchi moltiplicatori, assumono valori compresi tra $+30^\circ$ e -30° e quindi possono essere utilizzate dallo schema di controllo per muovere il sollevatore telescopico. In figura 3.11 è riportato lo schema complessivo del sottosistema che assolve alle funzioni fin qui descritte.

Per come è stata costruita la procedura di calibrazione non si ottengono i veri angoli di inclinazione della leva in quanto il fattore di conversione tra la lettura dell'angolo fisico reale e l'angolo utilizzato nella simulazione viene variato in modo che i valori siano sempre compresi tra $+30^\circ$ e -30° , rinunciando però così alla corrispondenza fisica tra angolo utilizzato e angolo reale (le differenze sono comunque contenute).

3.4 Modello semplificato del sollevatore

I comandi impartiti con il joystick vengono tradotti in velocità di movimento degli azionamenti del sollevatore telescopico secondo i metodi trattati nei paragrafi 3.5.1 e 3.5.2. Da queste velocità si ricavano quindi poi gli allungamenti dei cilindri idraulici, cioè s_2 e s_4 , tramite il sottosistema descritto nel paragrafo 3.2. La conoscenza di s_2 e s_4 permette, tramite il modello semplificato descritto nell'appendice A, di ricavare quindi la posizione del baricentro della macchina e stimare la vicinanza al limite di stabilità del sistema. Allo scopo di modellizzare i ritardi di misura e di elaborazione del segnale presenti sul sistema fisico reale sono stati introdotti dei ritardi di trasmissione sui segnali relativi al calcolo della corsa dell'attuatore di sollevamento e di estensione. In questo sottosistema vengono inoltre definiti una serie di limiti, calcolati in base alla posizione del *limite di stabilità*, che coincide con la coordinata X del bordo anteriore del poligono di chiusura, che sono utilizzati per realizzare il controllo di stabilità della macchina.

Considerando il controllo associato al comando di sollevamento (descritto in modo completo nel paragrafo 3.5.1) si definiscono due ulteriori posizioni, entrambe relative alla coordinata X del baricentro della macchina. Si ha infatti un *limite di fine frenatura* e un *limite di inizio frenatura* (mostrati in figura 3.12) che individuano una zona all'interno della quale la massima velocità di discesa del braccio telescopico viene diminuita in modo da garantire al sistema di controllo di essere sempre in grado di mantenere il sistema in condizioni di sicurezza.

Considerando invece il controllo associato al comando di estensione si definisce un *limite di sicurezza* (che può coincidere con il *limite di fine frenatura* del controllo di sollevamento) relativo alla coordinata X del baricentro della macchina da cui si ricava, tramite le formule descritte nell'appendice A, il valore dell'estensione del braccio (detta *estensione limite di sicurezza*) che porterebbe il baricentro sul *limite di sicurezza*, a parità di lunghezza dell'attuatore di sollevamento. Impo-
nendo $X_G = X_{G,sicurezza}$ si può cioè ricavare il relativo valore di s_4 , chiamato *estensione limite di sicurezza*. Si ha infatti

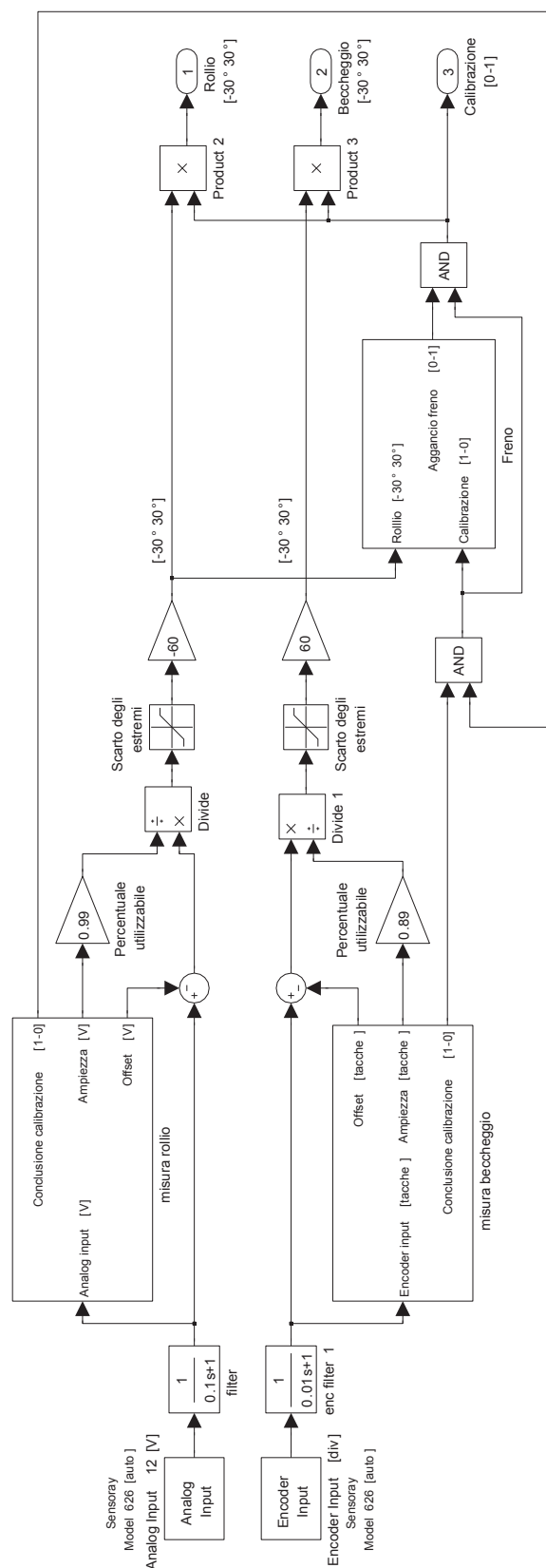


Figura 3.11: Struttura dello schema definito per eseguire la calibrazione del joystick e leggere i valori di rollio e beccheggio della leva imposti dall'operatore.

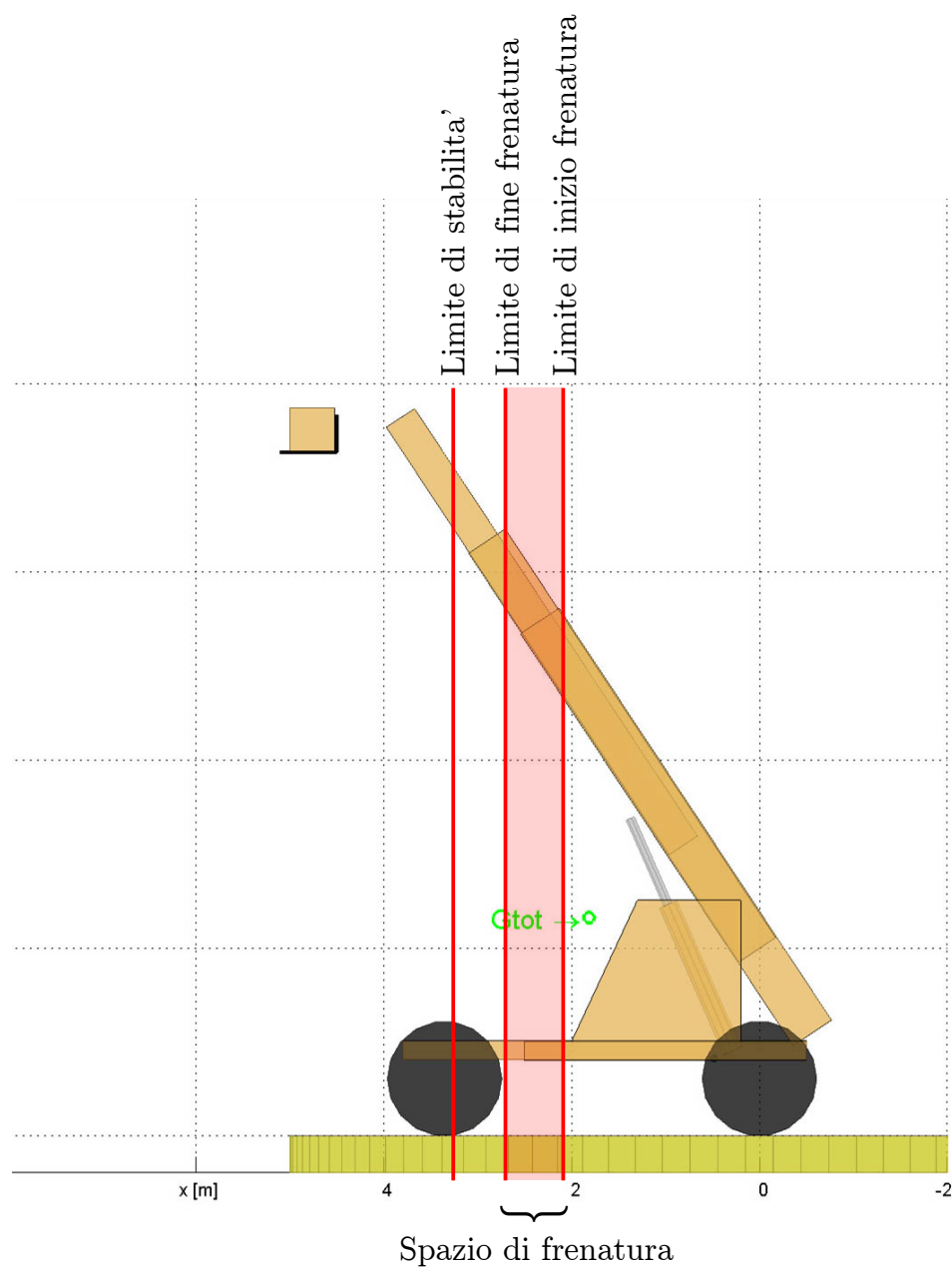


Figura 3.12: Limiti definiti all'interno dello spazio di lavoro del sollevatore per realizzare il controllo di stabilità applicato all'attuatore di sollevamento (nei test che sono stati realizzati il limite di fine frenatura è stato posto a 150 mm dal limite di stabilità, mentre lo spazio di frenata è stato considerato uguale a 250 mm).

$$X_G = \frac{M_{veicolo} \cdot X_{G,veicolo} + M_{carico} \cdot X_{G,carico}}{M_{veicolo} + M_{carico}}$$

dove

$$X_{G,veicolo} = \cos(\beta_3) \cdot (A_x \cdot s_4 + B_x) + \sin(\beta_3) \cdot C_x + D_x$$

$$X_{G,carico} = \rho_w \cdot \cos(\beta_6 + \varphi_w) + (p_1 + 2 \cdot s_4) \cdot \cos(\beta_3) + p_2 \cdot \sin(\beta_3) - x_c + p_3$$

I calcoli della coordinata X del baricentro del veicolo e del carico possono essere riscritti come

$$X_{G,veicolo} = [X_{G,veicolo}^{\{1\}}] + [X_{G,veicolo}^{\{2\}}] \cdot s_4 = [\cos(\beta_3) \cdot B_x + \sin(\beta_3) \cdot C_x + D_x] + [\cos(\beta_3) \cdot A_x] \cdot s_4$$

$$X_{G,carico} = [X_{G,carico}^{\{1\}}] + [X_{G,carico}^{\{2\}}] \cdot s_4 = [\rho_w \cdot \cos(\beta_6 + \varphi_w) + p_1 \cdot \cos(\beta_3) + p_2 \cdot \sin(\beta_3) - x_c + p_3] + [2 \cdot \cos(\beta_3)] \cdot s_4$$

quindi la formula per il calcolo di X_G diventa

$$X_G = \frac{M_{veicolo} \cdot X_{G,veicolo}^{\{1\}} + M_{carico} \cdot X_{G,carico}^{\{1\}}}{M_{veicolo} + M_{carico}} + \frac{(M_{veicolo} \cdot X_{G,veicolo}^{\{2\}} + M_{carico} \cdot X_{G,carico}^{\{2\}})}{M_{veicolo} + M_{carico}} \cdot s_4$$

che può essere riscritta in forma compatta come

$$X_G = X_G^{\{1\}} + X_G^{\{2\}} \cdot s_4$$

Noto l'allungamento dell'attuatore di sollevamento è possibile calcolare l'angolo β_3 che permette quindi di ricavare l'*estensione limite di sicurezza* come

$$s_{4,limite} = \frac{X_{G,sicurezza} - X_G^{\{1\}}}{X_G^{\{2\}}}$$

Questa *estensione limite di sicurezza* è utilizzata inoltre per definire un'ulteriore *estensione di attrazione* posta ad una certa distanza. Il parametro che però viene in realtà utilizzato dallo schema di controllo è detto *estensione di controllo*, che assume il valore dell'*estensione di attrazione* quando l'estensione comandata raggiunge o supera questo limite, altrimenti assume lo stesso valore dell'estensione effettiva del braccio. Il significato di questi limiti, riportati anche in figura 3.13, è descritto in modo più dettagliato nel paragrafo 3.5.2.

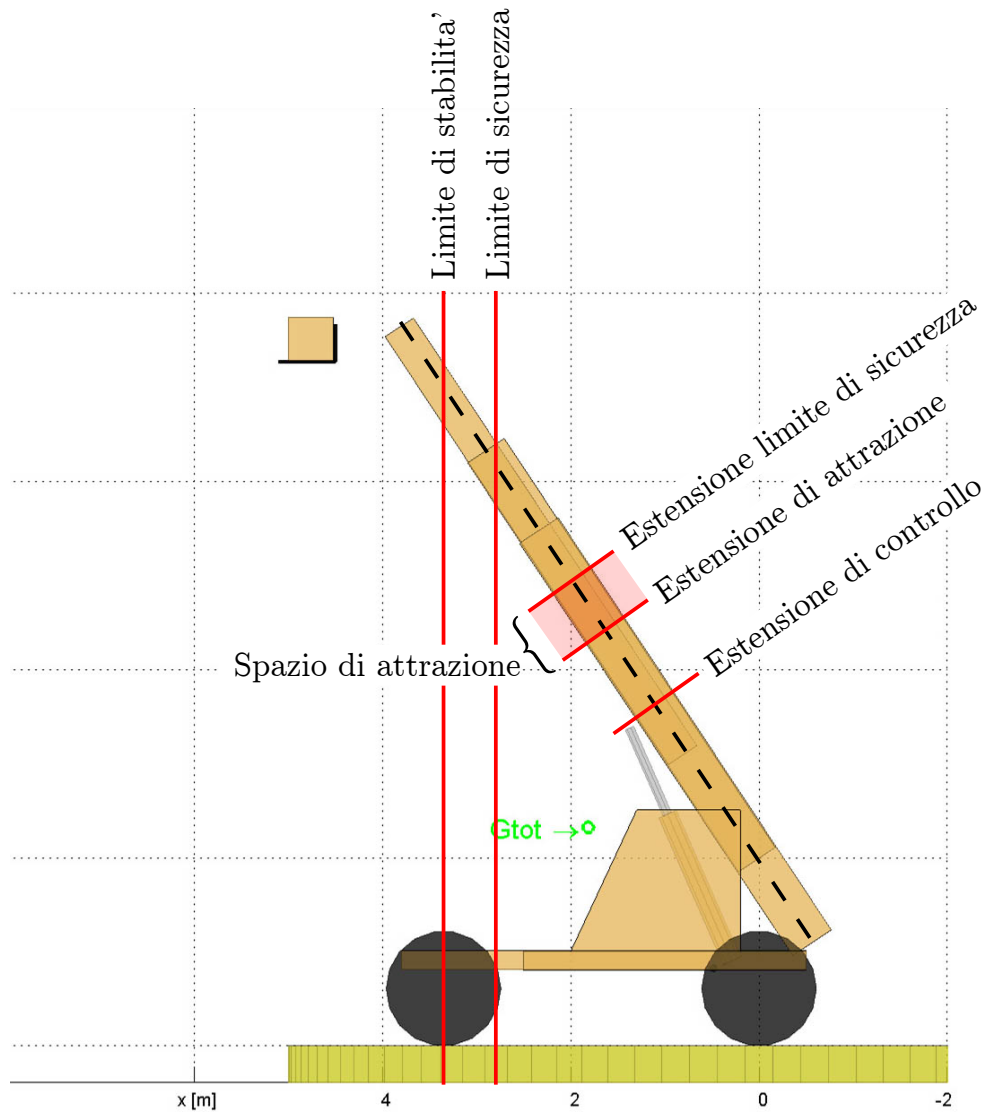


Figura 3.13: Limiti definiti all'interno dello spazio di lavoro del sollevatore e lungo l'asse del braccio telescopico per realizzare il controllo di stabilità applicato all'attuatore di estensione (nei test che sono stati realizzati il limite di sicurezza è stato posto a 150 mm dal limite di stabilità, mentre lo spazio di attrazione è stato considerato uguale a 50 mm).

3.5 Controllo della stabilità

Il controllo di stabilità che è stato implementato ha lo scopo di evitare che il baricentro del sollevatore possa finire oltre i limiti del poligono di stabilità; nel contempo il sistema si occupa fornire anche un feedback di forza sulla leva del joystick impugnata dall'operatore per avvisarlo del pericolo sopraggiunto. In questa prima fase il controllo è stato sviluppato trascurando le caratteristiche dinamiche del sistema, considerando quindi solo il modello statico, descritto nell'appendice A. L'obiettivo di questo lavoro è stato infatti quello di valutare l'applicabilità dei modelli limitati al caso statico, quindi lo studio dovrà essere in futuro esteso per considerare anche le forze, le velocità e le accelerazioni della macchina.

3.5.1 Comando di sollevamento

Il comando di sollevamento per tutti i tre schemi funziona sempre nella modalità detta "Rate Control", quindi anche lo schema di controllo applicato a questo asse è in tutti i tre casi lo stesso. Si è scelta questa modalità di comando per questo asse perché essa corrisponde a quella normalmente utilizzata sui sollevatori industriali, dove la leva del joystick è mantenuta in posizione verticale da una serie di molle e la sua inclinazione comanda la velocità di movimento degli attuatori idraulici (sia agendo direttamente sulle valvole dell'impianto idraulico, sia tramite un sistema di controllo elettronico delle stesse).

Riportando in una rappresentazione grafica il funzionamento di questo schema nel caso più generale si ottiene il diagramma di figura 3.16. Come si può vedere la leva del joystick è comandata in forza, cioè ad ogni sua inclinazione rispetto alla posizione di riposo verticale corrisponde una forza di richiamo che tende a riportarla nella situazione di partenza; tale forza è dovuta alle molle nel caso dei joystick idraulici ed elettro-idraulici ed è invece generata da un motore nel caso di un joystick aptico. Questa azione è rappresentata nello schema dalla retroazione di guadagno K che genera sulla leva del joystick una forza opposta allo spostamento, indipendente dall'effettivo comportamento dello slave.

Il sollevatore telescopico è invece comandato in velocità, cioè l'inclinazione del joystick imposta dall'utente genera un segnale di riferimento che è interpretato dallo slave come un comando di velocità da impartire agli attuatori. Se lo slave si muove in ambiente libero l'unica azione di forza presente sul master è quella dovuta alla retroazione K . Nel caso però in cui sullo slave venga a generarsi una forza, che nel caso del controllo di stabilità qui considerato è di tipo virtuale, cioè determinata da quanto il sollevatore si avvicina al limite di instabilità, questa

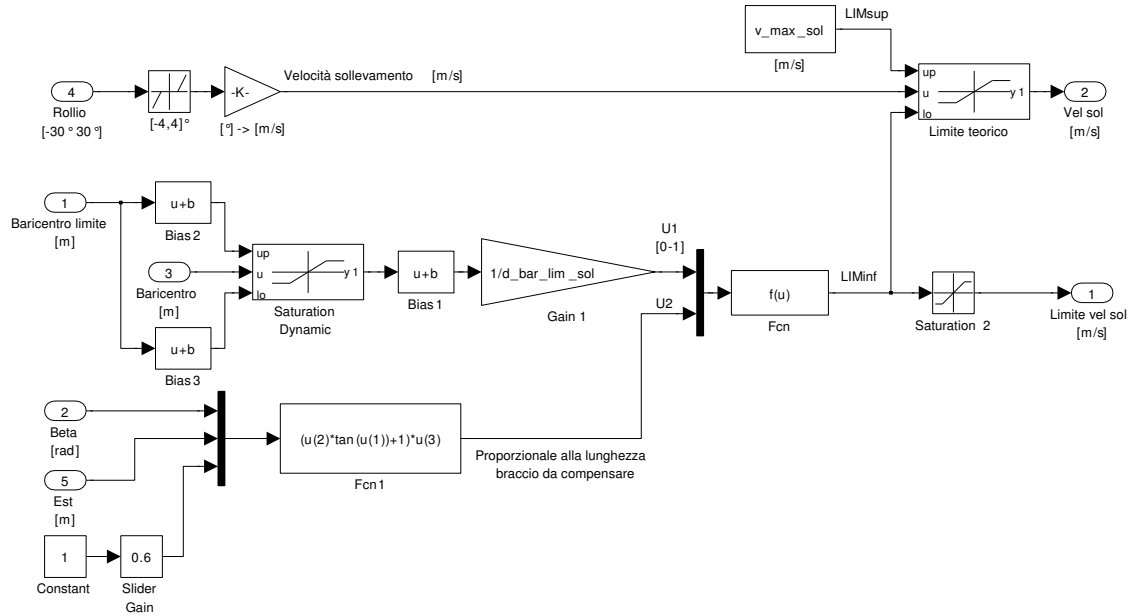


Figura 3.14: Controllo di stabilità dell'attuatore di sollevamento.

azione va a sommarsi a quella dovuta dalla retroazione K , segnalando all'operatore l'approssimarsi della situazione di pericolo.

Si può notare che non c'è corrispondenza di posizione tra master e slave, questa configurazione di controllo viene infatti normalmente utilizzata quando lo spazio di lavoro è ampio ed è necessario un posizionamento dello slave preciso, come appunto accade nell'utilizzo di un sollevatore telescopico.

In riferimento al comando dell'attuatore di sollevamento quando la leva si trova in posizione verticale il comando di velocità è nullo, piegando la leva verso destra si impone una velocità di sollevamento del braccio positiva, mentre piegando la leva verso sinistra si impone una velocità negativa. La forza impressa alla leva per riportarla nella posizione verticale è dovuta all'azione dalle molle del giunto elastico descritto nel capitolo 2, che nei test effettuati è mantenuto sempre bloccato dal freno on/off. Poiché quindi l'azione che viene ad esercitarsi su questo asse è solo di tipo passivo, non è possibile variare arbitrariamente la forza applicata sulla leva, si perde cioè la possibilità di generare un'azione che possa segnalare all'operatore l'avvicinamento alla zona di instabilità. La struttura dello schema di comando della leva nel caso di un azionamento passivo diventa infatti quello riportato in figura 3.17.

Lo schema che è stato implementato per il controllo di stabilità dell'attuatore di sollevamento è riportato in figura 3.14. Il comando imposto dall'operatore muovendo il joystick è convertito in velocità di estensione dell'attuatore di

sollevamento tramite la proporzione

$$\frac{angolo_{rollio}}{angolo_{rollio,MAX}} = \frac{velocità_{sollevamento}}{velocità_{sollevamento,MAX}}$$

da cui deriva

$$velocità_{sollevamento} = \frac{velocità_{sollevamento,MAX}}{angolo_{rollio,MAX}} \cdot angolo_{rollio} \quad (3.1)$$

Per evitare che l'operatore possa imporre movimenti non voluti inoltre l'angolo di rollio acquisito viene fatto passare attraverso un blocco *Dead Zone* che genera un'uscita nulla anche quando la leva non è esattamente in posizione verticale, ma si trova comunque in un suo intorno (in questo caso $\pm 4^\circ$). Il valore di velocità calcolato con la formula 3.1 viene quindi poi fatto passare attraverso un blocco di saturazione che ha il limite superiore fisso, infatti sollevando il braccio della macchina il baricentro tende sempre ad allontanarsi dalla zona di instabilità e quindi il movimento può essere sempre fatto alla massima velocità, mentre il limite inferiore è calcolato in base a quanto il baricentro si trova vicino al limite di sicurezza e alla configurazione del braccio telescopico.

Il calcolo del baricentro è fatto dal blocco che modella il sollevatore tramite le formule semplificate riportate nel paragrafo A, il valore ottenuto viene passato attraverso un blocco di saturazione che mantiene il valore compreso tra la posizione del *limite di inizio frenatura* e il *limite di fine frenatura* mostrati in figura 3.12. Al valore così ottenuto viene sottratta la posizione del *limite di inizio frenatura* e il risultato viene diviso per l'ampiezza dello *spazio di frenatura*, in modo da avere un numero variabile tra 0 e 1 (indicato come U_1), dove a 0 corrisponde una posizione sicura del baricentro, mentre ad 1 per una configurazione della macchina che ha portato il baricentro sul *limite di fine frenatura* (o oltre).

Come è stato già accennato la velocità di discesa massima del braccio telescopico dipende anche dalla sua configurazione, più precisamente dalla lunghezza del segmento che il sistema di controllo dello sfilo deve essere in grado di compensare per evitare che il baricentro esca dai limiti di sicurezza mentre il braccio viene fatto scendere. Facendo riferimento alla figura 3.15a, in cui è riportato il diagramma di carico del sollevatore telescopico preso in esame, supponendo di trasportare ad esempio un carico di 2500 Kg si ha che, nelle vicinanze del limite di stabilità dove il diagramma diventa praticamente verticale, se si compie una rotazione del braccio verso il basso, supponendo di mantenere costante la lunghezza, il controllo dello sfilo deve riuscire a far rientrare la parte di braccio che esce oltre il limite del diagramma, cioè ΔL . Poiché non è necessario conoscere

esattamente questa quantità, si può fare riferimento allo schema semplificato di figura 3.15b, che in base alla configurazione del braccio consente comunque di avere una stima di quanto dovrà agire il controllo dello sfilo per mantenere il sollevatore in condizioni di sicurezza. Si ha infatti:

$$\tan(\beta) \approx \frac{\Delta L}{s_4 \cdot \Delta\beta}$$

$$\Delta L \approx s_4 \cdot \tan(\beta) \cdot \Delta\beta$$

con:

$$\Delta\beta = \dot{\beta}(t) \cdot dt$$

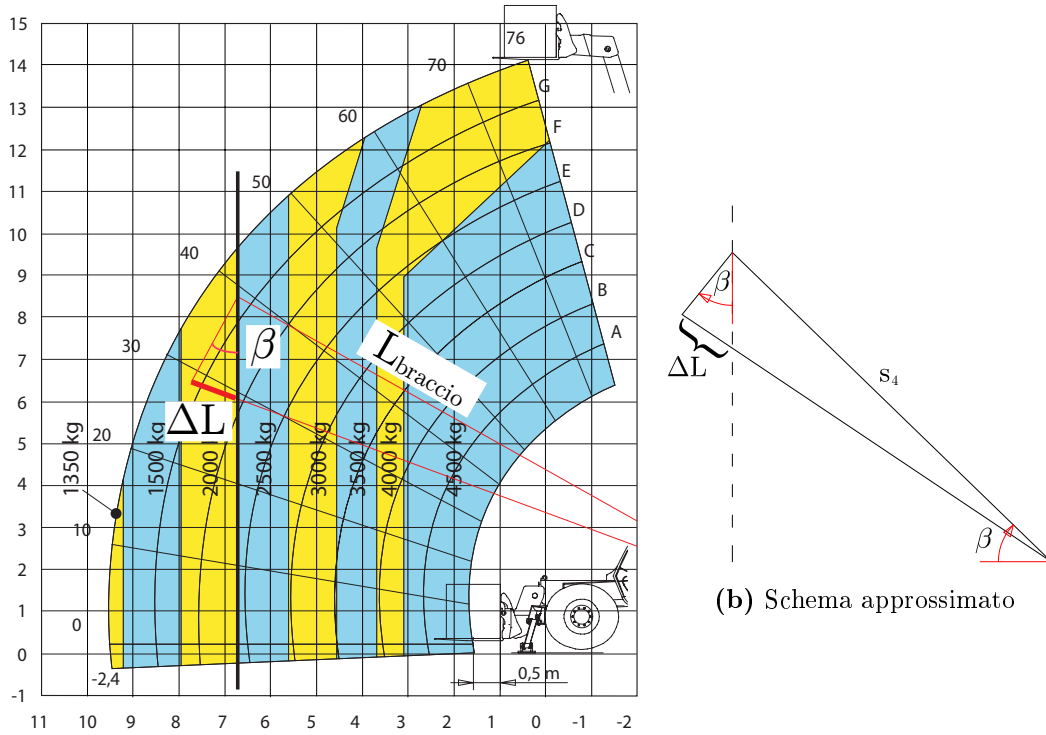
$$\Delta L = \dot{s}_4(t) \cdot dt$$

si avrà:

$$\dot{\beta}(t) \leq \frac{velocità_{sollevamento, MAX}}{s_4(t) \cdot \tan(\beta(t))}$$

$$velocità_{sollevamento, MAX} \geq s_4 \cdot \tan(\beta(t)) \cdot \dot{\beta}(t)$$

si ha quindi che il tratto di sfilo che il controllo dovrà compensare è proporzionale a $s_4 \cdot \tan(\beta)$.



(a) Schema riportato sul diagramma di carico della macchina.

Figura 3.15: Schemi per il calcolo approssimato di ΔL .

Il calcolo del limite di discesa dell'attuatore di sollevamento è quindi fatto con la formula

$$LIM_{inf} = -velocità_{sollevamento,MAX} \left(1 - U_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{U_2} \right) \right)$$

Dove il termine che moltiplica la velocità massima serve a ridurla in base alla vicinanza al limite di stabilità e alla lunghezza del braccio che deve essere fatto rientrare dal controllo di estensione. Il termine U_1 , definito in precedenza, assume valori compresi tra 0 e 1 in funzione della vicinanza al *limite di fine frenatura*. Nel caso in cui il baricentro sia interno ai limiti di sicurezza questo termine assume il valore 0 e quindi la discesa del braccio può avvenire a velocità massima, altrimenti essa viene ridotta. La quantità di riduzione della velocità dipende anche da un secondo fattore, dove compare il termine U_2 che è definito come

$$U_2 = K \cdot (s_4 \cdot \tan(\beta) + 1)$$

dove $s_4 \cdot \tan(\beta)$, come si è visto, è proporzionale al tratto di filo che il controllo di estensione deve essere in grado di compensare, mentre K è un coefficiente

numerico ricavato sperimentalmente che dipende dal rapporto tra la massima velocità di estensione e la massima velocità di sollevamento del braccio. Maggiore è il valore assunto dal termine $s_4 \cdot \tan(\beta)$, più grande è il fattore $\left(1 - \frac{1}{U_2}\right)$ e quindi maggiore è la riduzione della velocità di discesa del braccio.

3.5.2 Comando di estensione

Per gestire il comando di estensione del braccio, associato al movimento di beccheggio della leva del joystick, sono state definite 3 diverse modalità di controllo, descritte qui di seguito.

Schema di controllo tipo “Rate Control”

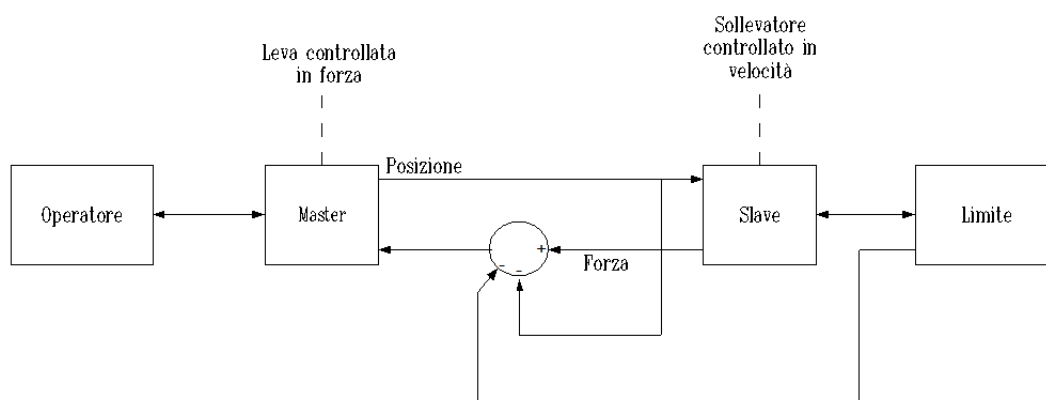


Figura 3.16: Schema di controllo “Rate Control” con ritorno di forza

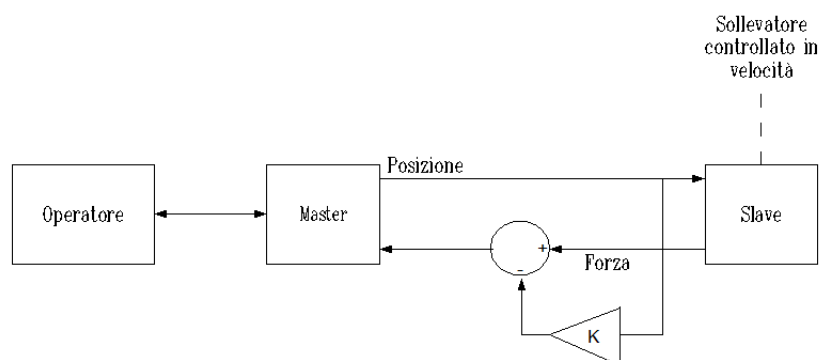


Figura 3.17: Schema di controllo “Rate Control” nel caso di utilizzo di un attuatore passivo per generare la forza di richiamo della leva.

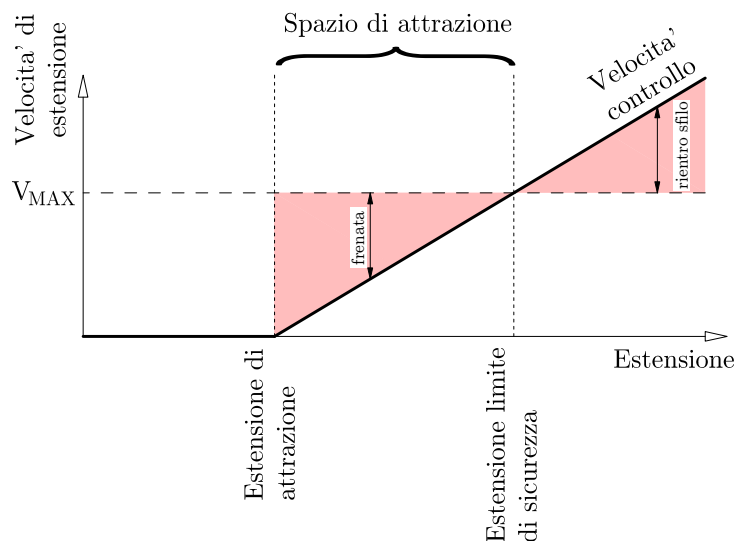


Figura 3.18: Andamento dell'azione di controllo che va ad agire sulla velocità di estensione imposta dall'utente.

Nel caso del comando di estensione lo schema “Rate Control”, è realizzato generando la forza di richiamo tramite il motore in corrente continua posto sull'asse di beccheggio, quindi ciò consente di sfruttare pienamente lo schema di figura 3.16 per segnalare all'operatore l'approssimarsi del limite di stabilità, diversamente da quanto è possibile fare con il comando di sollevamento (dove l'attuatore è mantenuto sempre bloccato).

Il comando imposto dall'operatore muovendo il joystick è convertito in velocità di allungamento dell'attuatore di estensione tramite la proporzione

$$\frac{\text{angolo}_{\text{beccheggio}}}{\text{angolo}_{\text{beccheggio},MAX}} = \frac{\text{velocità}_{\text{estensione}}}{\text{velocità}_{\text{estensione},MAX}}$$

da cui deriva

$$\text{velocità}_{\text{estensione}} = \frac{\text{velocità}_{\text{estensione},MAX}}{\text{angolo}_{\text{beccheggio},MAX}} \cdot \text{angolo}_{\text{beccheggio}} \quad (3.2)$$

Per evitare che l'operatore possa imporre movimenti non voluti l'angolo di beccheggio acquisito viene fatto passare attraverso un blocco *Dead Zone* che genera un'uscita nulla anche quando la leva non è esattamente in posizione verticale, ma si trova comunque in un suo intorno (in questo caso $\pm 1^\circ$). Il valore di velocità calcolato con la formula 3.2 viene quindi poi fatto passare attraverso un blocco di saturazione che assicura che la velocità imposta sia entro i limiti propri dell'attuatore di estensione.

Il controllo vero e proprio viene fatto sottraendo alla velocità di estensione una quantità proporzionale alla differenza tra l'estensione effettiva del braccio e l'*estensione di controllo*, calcolata come descritto nel paragrafo 3.4. Si ha quindi che la riduzione della velocità di estensione avviene solo se la corsa di estensione supera l'*estensione di attrazione* perché negli altri casi la differenza calcolata è nulla. Il coefficiente moltiplicativo di questa differenza è definito in modo che l'azione di controllo possa annullare (o rendere negativa) la velocità di estensione del braccio solo se questa uguaglia (o supera) l'*estensione limite di sicurezza*, cioè

$$velocità_{estensione, controllo} = \frac{velocità_{estensione, MAX}}{spazio_{attrazione}} \cdot (estensione - estensione_{attrazione})$$

dove $spazio_{attrazione} = estensione - estensione_{attrazione}$. L'operatore quindi, all'interno dello *spazio di attrazione*, individuato dall'*estensione di controllo* e dall'*estensione limite di sicurezza*, ha la possibilità di controbilanciare l'azione di controllo in quanto questa si mantiene inferiore al comando massimo che l'utente può imporre, come mostrato in figura 3.18. Se invece l'estensione del braccio supera l'*estensione limite di sicurezza* (per come è stato definito questo limite ciò implica che il baricentro della macchina superi il *limite di sicurezza*) il controllo prende il sopravvento in modo da evitare che il baricentro possa raggiungere e superare il *limite di stabilità*.

Per come è stato definito lo schema di controllo dell'estensione, si ha che il controllo agisce in modo da annullare la differenza tra la velocità di estensione imposta dall'operatore e la velocità calcolata dall'anello di retroazione, ciò crea in questo caso particolare anche nella modalità detta "Rate Control" una sorta di controllo di posizione che rende direttamente proporzionali l'inclinazione della leva del joystick (calcolata rispetto alla posizione verticale) e l'estensione del braccio (calcolata rispetto all'*estensione di attrazione*), come si può vedere anche dallo schema riportato in figura 3.20. Supponendo infatti di non variare l'inclinazione del braccio telescopico, quando la leva del joystick viene portata a finecorsa sull'asse di rollo l'estensione assume il valore dell'*estensione limite di sicurezza*, mentre se la leva viene portata al centro (o se viene lasciata libera di muoversi) l'estensione assume il valore dell'*estensione di attrazione*. Si ottiene infatti la relazione

$$\Delta angolo_{leva} \cdot K_1 = \Delta est \cdot K_2$$

che può essere scritta come

$$\Delta est = \frac{K_1}{K_2} \cdot \Delta angolo_{leva} = \frac{velocità_{estensione, MAX}}{angolo_{beccheggio, MAX}} \cdot \frac{spazio_{attrazione}}{velocità_{estensione, MAX}} \cdot \Delta angolo_{leva}$$

da cui deriva

$$\Delta_{est} = \frac{spazio_{attrazione}}{angolo_{beccheggio,MAX}} \cdot \Delta_{angolo_{leva}}$$

Lo schema di controllo risultante è riportato in figura 3.19, dove è presente anche un blocco moltiplicativo che consente di disabilitare lo schema durante l'esecuzione dei test. Per quanto riguarda il controllo della leva in questo schema, se non interviene il controllo di stabilità sull'estensione del braccio, il motore agisce in modo da simulare la presenza di molle che tendono a far ritornare la leva sempre nella posizione centrale, a cui corrisponde, come per il comando di sollevamento, velocità nulla degli attuatori.

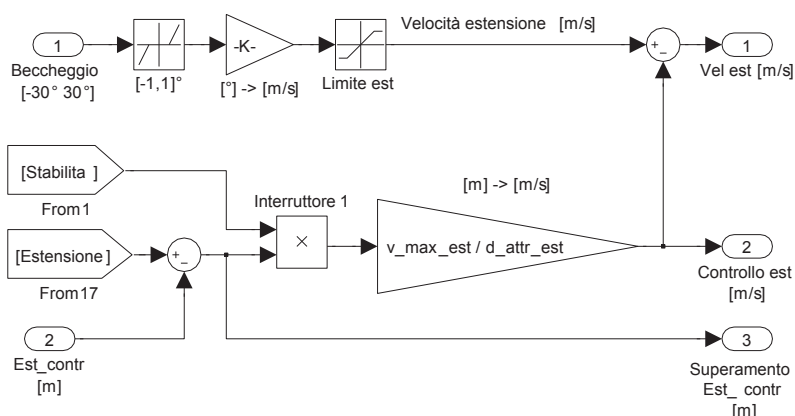


Figura 3.19: Controllo di stabilità dell'estensione nello schema "Rate Control".

Per fare ciò l'angolo di inclinazione viene usato come riferimento per un controllo di tipo proporzionale-derivativo (PD) che ha in uscita la tensione da applicare al motore. Si realizza cioè lo schema di figura 3.21.

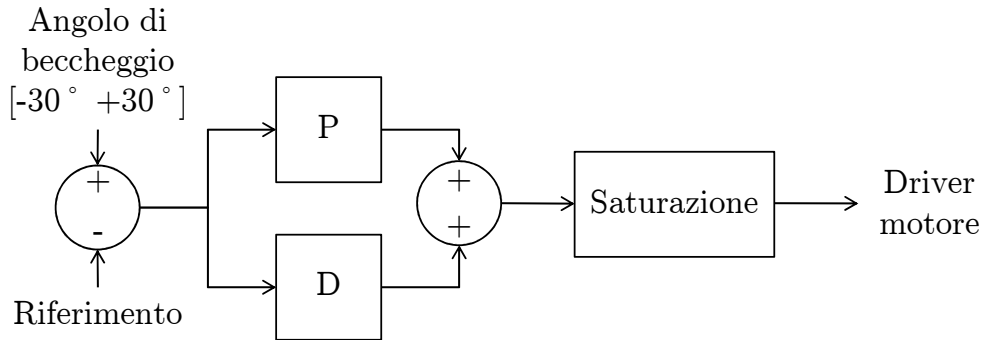


Figura 3.21: Struttura dello schema di controllo della leva del joystick.

Quando invece si ha il superamento dell'*estensione di attrazione* da parte dell'estensione effettiva del braccio, la differenza tra le due estensioni entra nello schema di figura 3.21 spostando il riferimento del controllore PD in modo che la leva tenda ad essere portata in una posizione a cui corrispondono velocità di estensione negative. In questo modo se l'operatore mantiene ferma la leva del joystick sentirà una forza maggiore perché aumenta la distanza tra l'angolo della leva e il riferimento (che prima era nullo mentre adesso è negativo), se invece l'operatore asseconda il movimento della leva sarà portato a muoverla verso posizioni a cui corrispondono velocità negative (che quindi causano il rientro dello sfilo) finché l'estensione del braccio non diventa minore dell'*estensione di attrazione*.

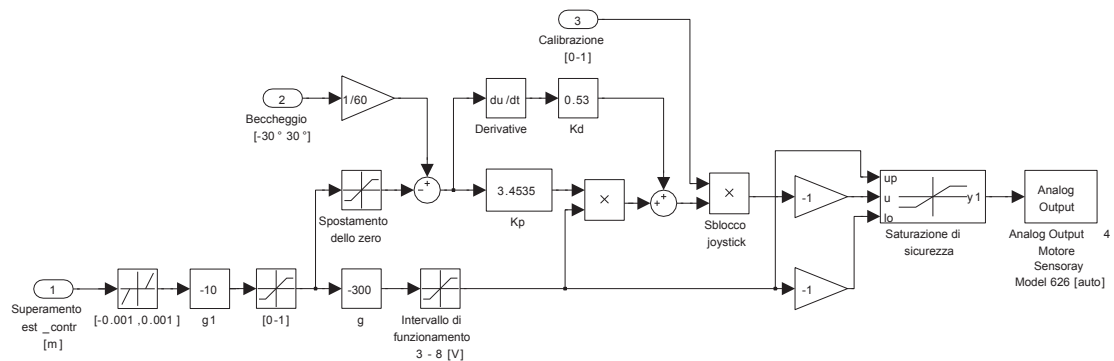
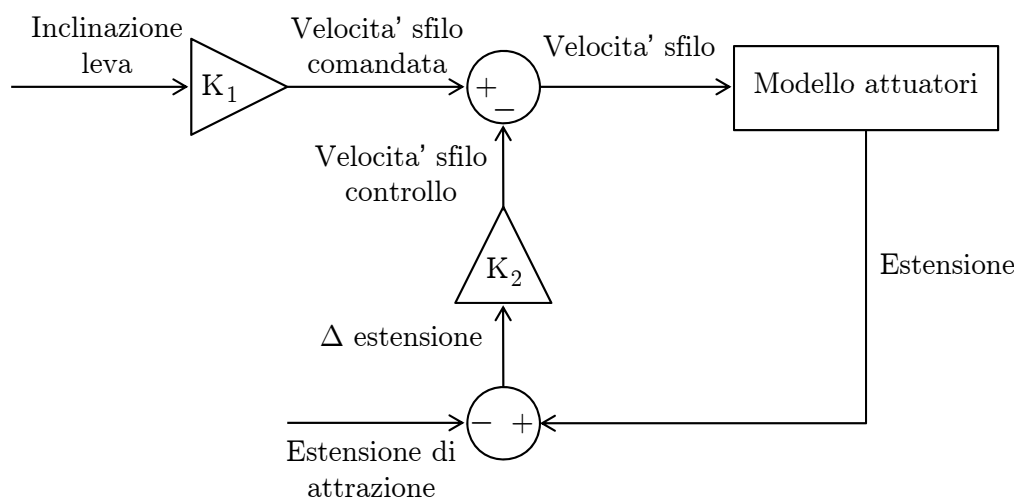


Figura 3.22: Schema di controllo della leva del joystick nello schema di comando tipo “Rate Control”.

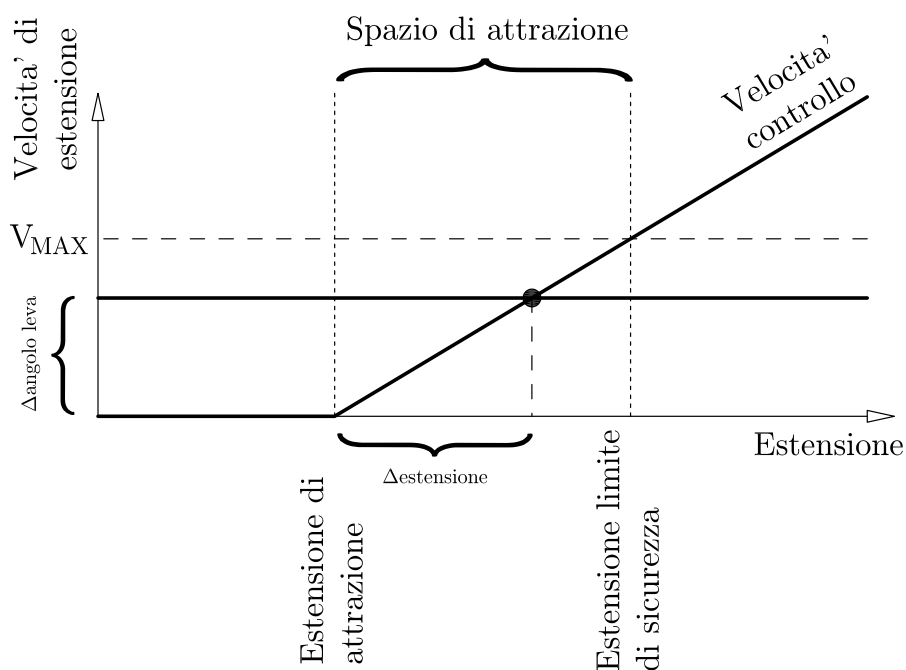
Per incrementare la forza che agisce sull'operatore quando si attiva il controllo di stabilità viene anche incrementato il guadagno proporzionale del controllore



$$K_1 = \frac{velocità_{estensione,MAX}}{angolo_{beccheggio,MAX}}$$

$$K_2 = \frac{velocità_{estensione,MAX}}{spazio_{attrazione}}$$

(a)



(b)

Figura 3.20: La figura 3.20a mostra lo schema di controllo che si viene a realizzare quando l'estensione del braccio si trova all'interno dello *spazio di attrazione*, la stessa situazione è mostrata per via grafica nella figura 3.20b.

PD e vengono inoltre incrementati i limiti del blocco saturatore che governa la tensione applicata al motore collegato al movimento di beccheggio. In figura 3.22 è riportato il modello effettivamente usato per realizzare il controllo della leva del joystick.

Schema di controllo tipo “Lans”

Con questo controllo la leva è comandata in forza, mentre il sollevatore telescopico in posizione, come mostrato in figura 3.23. L’operatore agendo sul joystick impone un’inclinazione della leva che viene interpretata dallo slave come un comando di posizione, in questo caso quindi esiste una corrispondenza diretta di posizione tra master e slave. L’applicazione di una forza sullo slave, che è una forza virtuale nel caso del controllo di stabilità qui considerato, viene riportata sul master, che quindi a sua volta impone una forza all’operatore. L’entità di questa azione non dipende dalla posizione della leva del joystick, ma solo dall’intensità dell’azione applicata allo slave, cioè da quanto il baricentro della macchina si avvicina al limite di instabilità.

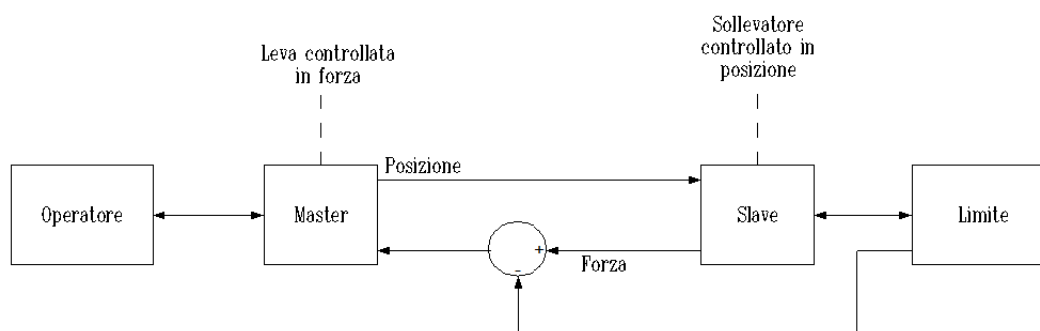


Figura 3.23: Schema di controllo “Lans”.

Nel caso in cui il baricentro del sollevatore telescopico sia interno ai limiti di sicurezza la forza virtuale è nulla e quindi non viene trasferita nessuna azione alla leva del joystick che quindi può essere mossa liberamente dall’operatore. Poiché, come si è visto, la posizione della leva e quella dello slave hanno una corrispondenza diretta e non sono presenti retroazioni di forza all’interno della zona di sicurezza, con questo schema si possono generare problemi di poca accuratezza e precisione dei movimenti dello slave se l’ambiente di lavoro è molto ampio.

Lo schema di controllo dell’estensione per questo schema funziona in modo simile al controllo dello schema tipo “Rate Control”, in questo caso però siccome la leva del joystick non impone più la velocità dell’attuatore, ma la sua posizione

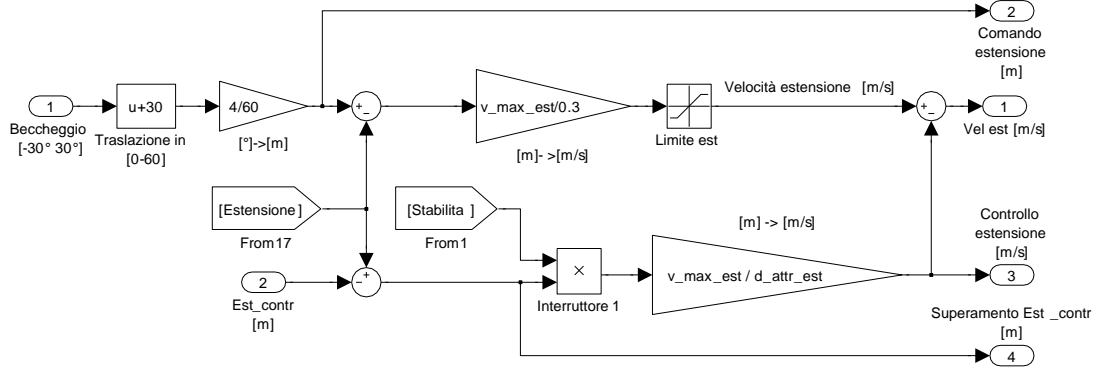


Figura 3.24: Controllo di stabilità dell'attuatore di estensione nello schema di comando tipo "Lans".

assoluta, si ha un loop di retroazione che calcola la velocità dell'attuatore di estensione in base alla differenza tra il valore imposto dal joystick e l'estensione effettiva. Come si può vedere dallo schema riportato in figura 3.24 l'angolo di beccheggio, che viene letto come un numero compreso tra -30° e $+30^\circ$, viene trasformato in un numero compreso tra 0 e 60° in modo da essere assimilabile alla corsa di estensione dell'attuatore, che va da 0 m a 4 m. Questo valore viene quindi poi trasformato nella corsa desiderata dell'attuatore sfruttando la proporzione

$$\frac{\text{angolo}_{\text{beccheggio}}}{\text{angolo}_{\text{beccheggio,MAX}}} = \frac{\text{estensione}}{\text{estensione}_{\text{MAX}}}$$

da cui deriva

$$\text{estensione} = \frac{\text{estensione}_{\text{MAX}}}{\text{angolo}_{\text{beccheggio,MAX}}} \cdot \text{angolo}_{\text{beccheggio}}$$

dove $\text{estensione}_{\text{MAX}} = 4 \text{ m}$ e $\text{angolo}_{\text{beccheggio,MAX}} = 60^\circ$. La differenza tra l'estensione imposta e l'estensione effettiva viene quindi moltiplicata per un coefficiente che permette di ottenere la velocità di estensione, che passa attraverso un blocco saturatore per mantenerla entro i limiti dell'attuatore.

Come si è già visto nel caso in cui il controllo di stabilità non sia attivo perché il sollevatore si muove all'interno della zona di sicurezza, sulla leva non è presente nessuna forza. L'operatore inizia a però a percepire una reazione sul joystick nel caso in cui cerchi di portare l'estensione del braccio oltre l'*estensione di attrazione*, in questo caso infatti viene attivato il controllo della leva che tramite un'azione proporzionale-derivativa tende a portare la leva ad assumere l'inclinazione corrispondente all'*estensione di attrazione*. Questa azione viene quindi attivata solo per movimenti della leva che porterebbero l'estensione a superare l'*estensione di*

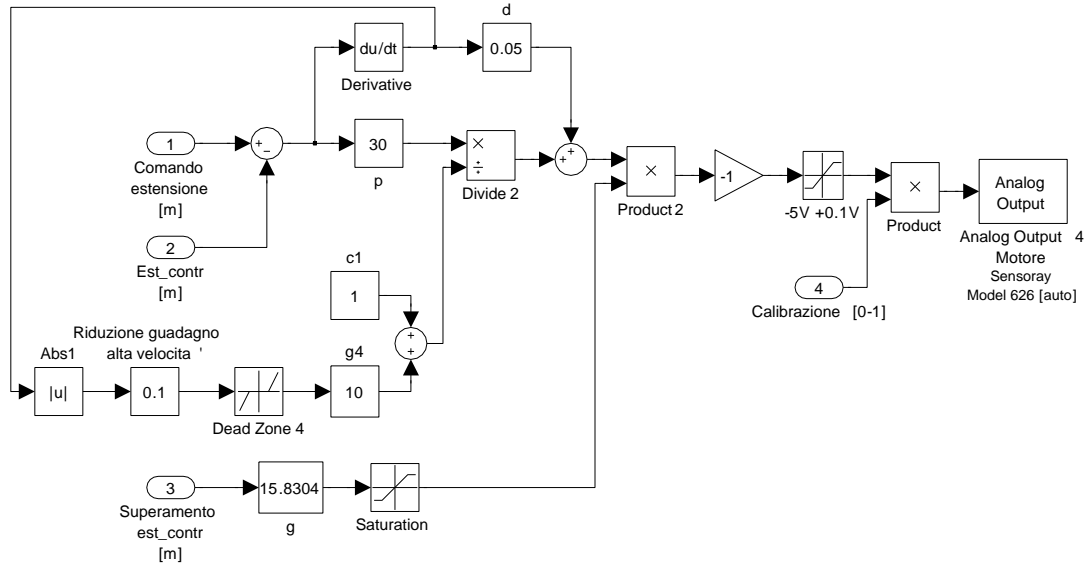


Figura 3.25: Schema di controllo della leva del joystick nello schema di comando tipo “Lans”.

attrazione mentre viene disattivata per comandi che fanno rientrare lo sfilo in posizione di sicurezza. Data questa asimmetria del controllo è stata introdotta un'azione che diminuisce il guadagno proporzionale se la velocità della leva supera un certo valore limite (determinato sperimentalmente). Per evitare fenomeni di instabilità è stato inoltre inserito un blocco saturatore che limita la massima tensione applicabile al motore; il limite di soglia inferiore è fissato a -5 V , mentre il limite superiore a $+0.1\text{ V}$. Questa differenza deriva dal fatto che al raggiungimento dell'*estensione di attrazione* devono essere impediti i movimenti del joystick che portano ad un aumento dell'estensione del braccio, mentre il movimento della leva verso valori di estensione inferiore deve essere permesso liberamente, dato che questi portano il baricentro sempre verso l'interno della zona di sicurezza. Nel caso di movimenti diretti ad aumentare l'estensione, l'entità della forza generata sulla leva (corrispondente ad una tensione negativa perché rivolta a diminuire lo sfilo) dipende inoltre da quanto l'estensione del braccio arriva a superare l'*estensione di attrazione*. Lo schema implementato è mostrato in figura 3.25.

Schema di controllo tipo “Haptic Joy”

Questo sistema consente di sfruttare la corrispondenza di posizione tra master e slave come nello schema “Lans” permettendo però nel contempo di ottenere movimenti dello slave precisi anche in ambienti di lavoro ampi. In questo caso,

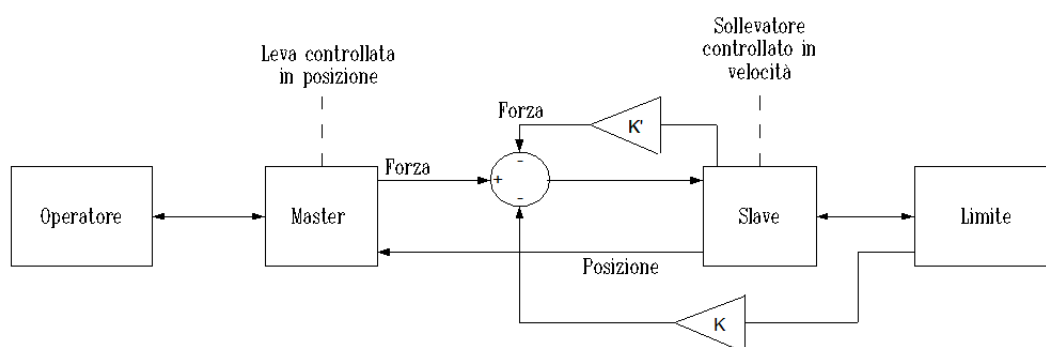


Figura 3.26: Schema di controllo “Haptic Joy”.

come si può vedere dallo schema di figura 3.26, l'angolo di inclinazione della leva del joystick è controllato dalla posizione dallo slave, che a sua volta è comandato in velocità dalla forza impressa dall'operatore sulla leva del joystick (supponendo che il ritorno di forza sia nullo, cioè che la movimentazione sia fatta entro i limiti di stabilità). Nel caso in cui il baricentro del sollevatore raggiunga i limiti della zona sicura il ritorno di forza assume un valore non nullo e quindi va a diminuire il comando di forza esercitato dall'operatore, fino ad annullarlo (o a farlo diventare negativo), annullando (o invertendo) quindi anche il comando di velocità dello slave, che a sua volta quindi blocca (o inverte) la rotazione della leva del joystick.

La forza che l'operatore impone sulla leva, interpretata come comando di velocità dallo slave, può essere misurata direttamente tramite degli estensimetri, oppure monitorando la corrente assorbita dal motore per controbilanciare la forza imposta dall'operatore. Poiché però queste misure tendono ad essere affette da disturbi elevati (soprattutto per forze di ridotta entità), è preferibile valutare l'azione dell'operatore come differenza tra l'angolo imposto alla leva dalla posizione dello slave e l'angolo effettivamente imposto dall'utente, moltiplicata per un opportuno coefficiente (se si considera una corrispondenza di tipo lineare).

Lo schema che realizza il controllo di estensione è uguale a quello utilizzato per lo schema tipo “Lans” (riportato in figura 3.24) perché l'operatore comanda sempre il valore assoluto dell'estensione del braccio, in questo caso però cambia il controllo effettuato sulla leva del joystick. Nella modalità “Haptic Joy” infatti l'azione sulla leva è attiva anche quando l'operatore muove il sollevatore entro i limiti di sicurezza, infatti il blocco di saturazione posto a valle dell'ingresso relativo al superamento del limite dell'estensione di attrazione ha un valore di soglia inferiore maggiore di zero, e quindi non va mai ad annullare completamente

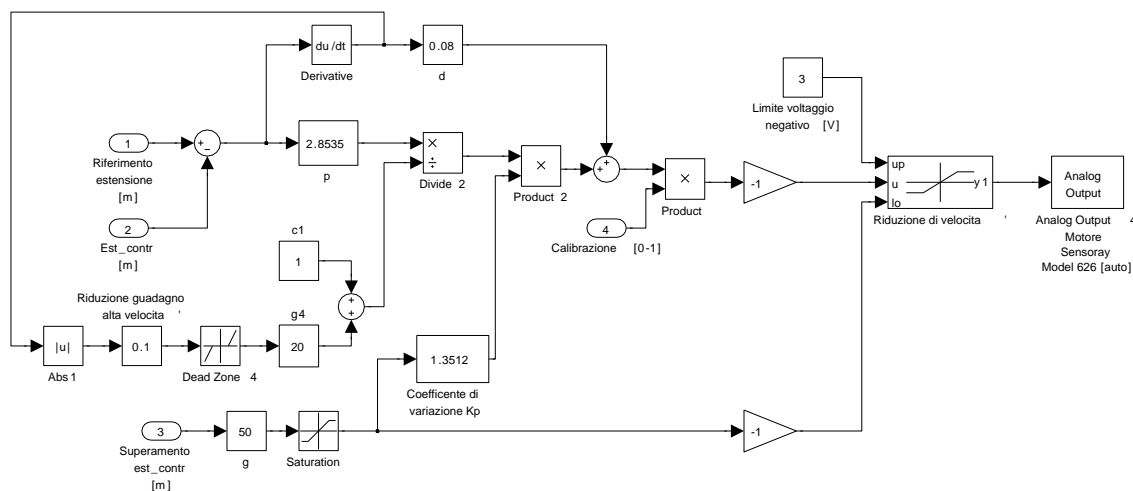


Figura 3.27: Schema di controllo della leva del joystick nello schema di comando tipo “Haptic Joy”.

il controllo, come accadeva invece con lo schema tipo “Lans”. In questo caso quindi, in condizioni di sicurezza, è sempre attivo il controllo di posizione proporzionale-derivativo sulla leva del joystick, che tende a far coincidere la sua posizione con quella corrispondente all’estensione effettiva del braccio, come prevede lo schema.

L’attivazione del controllo di stabilità comporta un aumento del coefficiente proporzionale del controllo, che aumenta quindi la forza percepita dall’utente; per lo stesso motivo viene aumentata anche la soglia del comando di tensione inviato al motore. Si aumenta solo la soglia negativa perché, come già illustrato per lo schema di controllo tipo “Lans”, in corrispondenza del limite della zona di stabilità sulla leva deve essere applicata una coppia diretta a diminuire lo sfilo, quindi di segno negativo e maggiore di quella derivante dallo schema di funzionamento standard del controllo “Haptic Joy”. I movimenti della leva che corrispondono ad un accorciamento del braccio non devono invece incontrare resistenze (corrispondenti in questo caso a coppie positive) superiori a quelle dovute al normale funzionamento del controllo.

Come per lo schema tipo “Lans” anche in questo caso è stata introdotta un’azione (la cui entità è stata determinata sperimentalmente) che diminuisce il guadagno proporzionale se la velocità della leva supera un certo valore limite allo scopo di limitare i problemi di instabilità del controllo. Lo schema di controllo della leva che si ottiene è mostrato in figura 3.27.

3.6 Invio dati

Come già illustrato nel paragrafo 3.1 la comunicazione tra lo schema di controllo e il computer che si occupa di visualizzare il sollevatore telescopico e raccogliere i dati della prova avviene su rete LAN tramite protocollo UDP, la tabella 3.1 riporta l'elenco dei parametri trasmessi dallo schema di controllo al computer che esegue il simulatore del sollevatore telescopico e che si occupa anche di salvare i dati delle prove.

Lunghezza del cilindro di sollevamento	[m]
Lunghezza del cilindro di estensione	[m]
Contatore ordine pacchetti	[]
Peso del carico portato dalle forche	[Kg]
Tempo	[s]
Corrente assorbita dal motore sull'asse di beccheggio	[A]
Coordinata X_G del baricentro calcolata con la formula semplificata	[m]
Angolo di rollio della leva del joystick (comando sollevamento)	[$^\circ$]
Angolo di beccheggio della leva del joystick (comando estensione)	[$^\circ$]
Limite della velocità di discesa del braccio telescopico	[$\frac{m}{s}$]
Misura del superamento dell' <i>estensione di controllo</i>	[m]
Coordinata X del bordo del poligono di stabilità	[m]
Attivazione del controllo di stabilità	[0 – 1]
Attivazione del feedback sulla leva del joystick	[0 – 1]
Tipologia di schema utilizzato	1 = Haptic Joy
	2 = Lans
	3 = Rate Control
Controllo velocità di estensione	[$\frac{m}{s}$]
Segnale di reset	[0 – 1]

Tabella 3.1: Elenco dei parametri trasmessi dal programma di controllo del joystick al programma di simulazione del sollevatore telescopico.

Capitolo 4

Test sperimentali

Per poter valutare l'efficacia degli schemi di controllo descritti nel capitolo 3 sono stati definiti due diverse tipologie di test, una che implicava il raggiungimento di alcune posizioni target poste in vicinanza del limite di stabilità della macchina, l'altra impiegava invece degli obiettivi sistemati all'interno della zona di sicurezza. In entrambi i casi si è utilizzato il simulatore del sollevatore telescopico modello WH714 prodotto da Komatsu.

4.1 Procedura di test

Nel test denominato “test di stabilità” l'operatore ha avuto il compito di posizionare l'end-effector del sollevatore, caricato con una massa di 1000 Kg , in corrispondenza di 3 posizioni target, segnalate da 3 cubi rossi, partendo da quello più in alto. Una volta raggiunta la posizione indicata l'oggetto bersaglio cambiava colore, passando dal rosso al blu. Se l'operatore manteneva la posizione dell'end-effector entro una certa distanza dal bersaglio per un determinato periodo di tempo il bersaglio diventava di colore verde, indicando quindi all'utente il completamento dell'obiettivo e la possibilità di raggiungere il bersaglio successivo. In figura 4.1 è mostrata un'immagine presa durante lo svolgimento di questo test, dove l'operatore ha già raggiunto la posizione 1 e si sta apprestando a completare il raggiungimento del target 2.

In questo test i target 2 e 3 sono stati posti sul limite della zona di intervento del controllo di stabilità dell'asse di estensione, quindi se l'operatore provasse a passare dalla posizione 2 alla posizione 3 mantenendo costante lo sfilo del braccio (in assenza di un controllo di stabilità), ciò causerebbe il ribaltamento del sollevatore in quanto il baricentro arriverebbe a sorpassare il limite di stabilità. La sequenza di figure 4.2a e 4.2b mostra questa situazione.

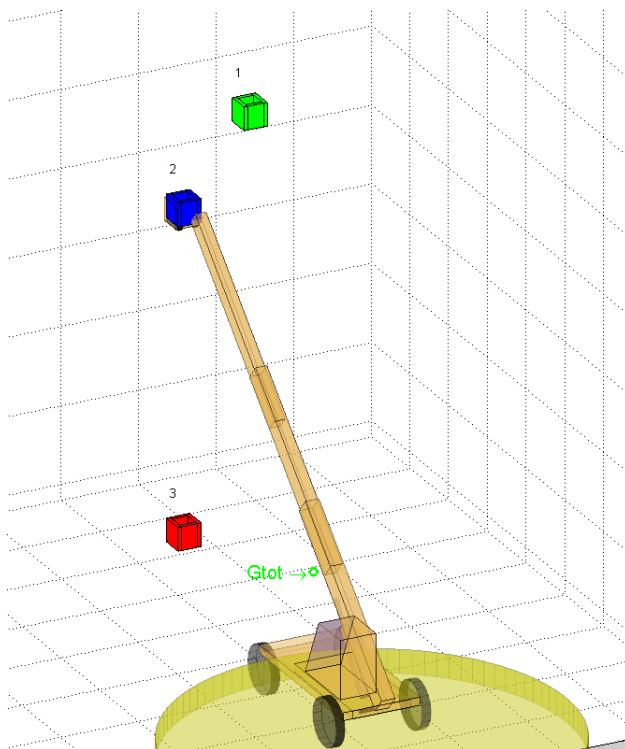


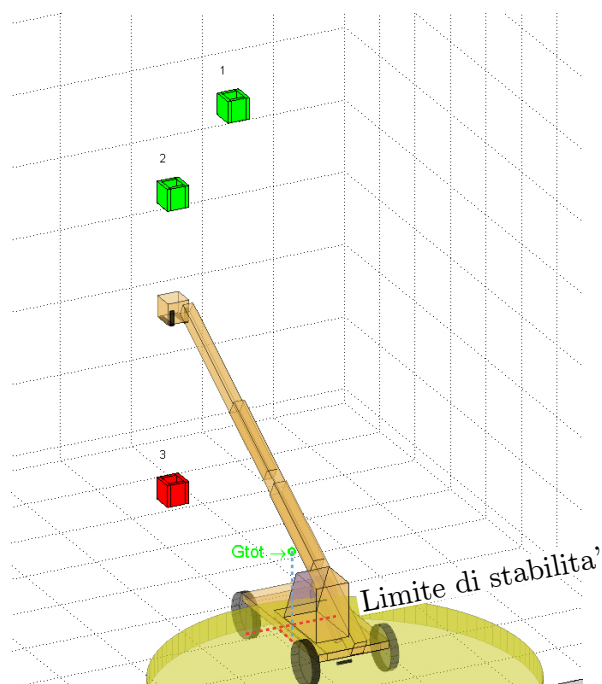
Figura 4.1: Immagine presa durante una fase della prova denominata “test di stabilità”.

Per l’esecuzione dell’operazione all’utente è stata data la possibilità di sperimentare tutte le varie modalità di utilizzo del joystick descritte nel capitolo 3, con e senza l’ausilio del controllo di stabilità o del feedback sulla leva, come riportato nella tabella 4.1. Nell’eventualità in cui l’operatore abbia causato il ribaltamento del veicolo la prova è stata sospesa e quindi ripetuta. Sono stati comunque registrati i tentativi falliti per l’analisi finale dei dati.

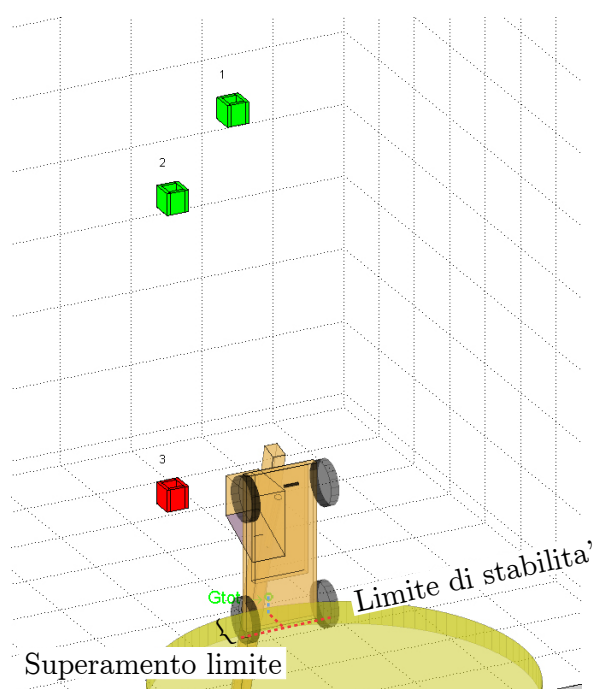
Schema di controllo		Controllo di stabilità	Feedback sulla leva
“Rate Control”	RC	—	—
“Rate Control”	RC +cs	✓	—
“Rate Control”	RC +cs +fb	✓	✓
“Lans”	L	—	—
“Lans”	L +cs +fb	✓	✓
“Haptic Joy”	HJ	—	—
“Haptic Joy”	HJ +cs +fb	✓	✓

Tabella 4.1: Schemi di controllo utilizzati nella modalità “test di stabilità”.

Nel caso della prova denominata “test di precisione” il compito che l’operatore



(a) Movimento del carico in prossimità del limite di stabilità della macchina.



(b) Superamento del limite di stabilità con conseguente ribaltamento del sollevatore telescopico

Figura 4.2: Ribaltamento del sollevatore telescopico in un'operazione di trasporto del carico dalla posizione target 2 alla posizione 3.

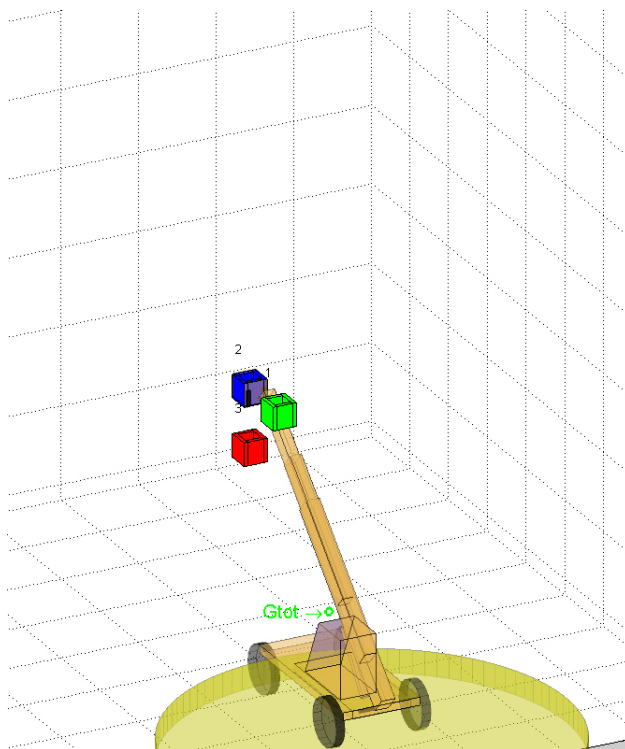


Figura 4.3: Immagine presa durante una fase della prova denominata “test di precisione”.

ha dovuto svolgere è simile a quello descritto per il test precedente, però in questa situazione i target sono posti più distanti dal limite di ribaltamento, quindi l'operatore ha potuto concentrarsi di più sull'obiettivo di raggiungere i target nel minor tempo possibile, senza valutare le problematiche legate alla stabilità. In figura 4.3 è mostrata una fase di questo test. Poiché in questa tipologia di test il compito implicava movimenti distanti dai bordi del poligono di stabilità, negli schemi utilizzati (“Rate Control”, “Lans” e “Haptic Joy”) sono stati disabilitati i controlli di stabilità e il relativo feedback sulla leva.

Per la raccolta dei dati, allo scopo di limitare le influenze dovute al fatto che l'operatore aumenta la confidenza con il sistema con l'esperienza, si è fatto in modo di eseguire i vari test con un ordine casuale. Per velocizzare il setup del sistema nel passaggio da una metodologia di test all'altra è stata realizzata l'interfaccia grafica mostrata in figura 4.4. Da questa schermata è possibile avviare il test scelto (1), resettare i parametri della finestra (2), impostare l'indirizzo IP del computer su cui viene eseguito lo schema di controllo del joystick (4), impostare i dati relativi all'operatore che sta eseguendo il test e visualizzare lo schema di controllo impiegato (7), visualizzare al termine della prova il tempo impiegato per raggiungere i vari target e la distanza minima di avvicinamento (8) e impostare

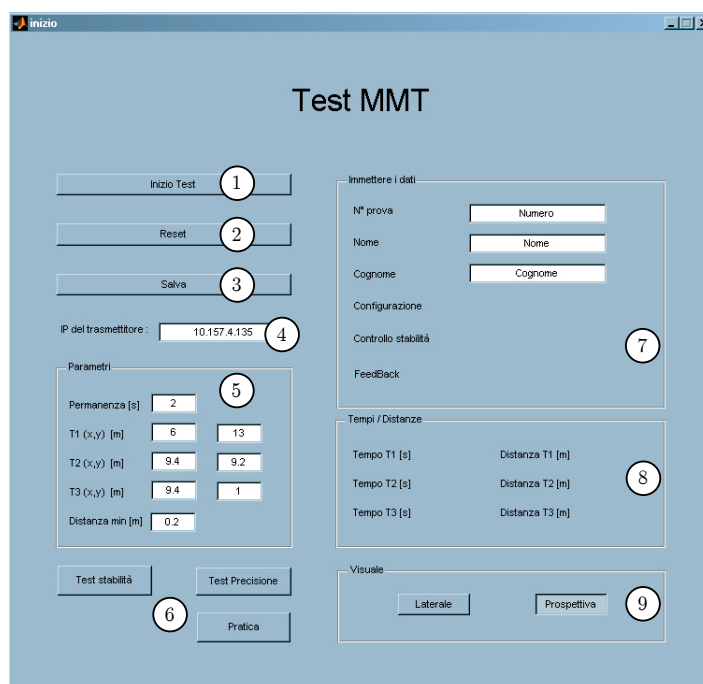


Figura 4.4: Interfaccia di setup dei test.

la modalità di visualizzazione del sollevatore telescopico e dell'ambiente di lavoro (9). L'impostazione della posizione di target, del tempo di permanenza e della distanza massima dall'obiettivo (5) può avvenire sia manualmente, sia utilizzando una serie di pulsanti (6) che consentono di riempire in modo automatico questi campi con dei valori predeterminati.

Tramite un apposito pulsante (3) è inoltre possibile salvare i dati acquisiti durante la prova in un file `.mat`, che contiene le informazioni dell'operatore, il tipo di controllo utilizzato e tutti i dati che vengono inviati dallo schema di controllo del joystick e che sono riportati nella tabella 3.1.

4.2 Elaborazione dei dati

I test che sono stati eseguiti hanno avuto come scopo principale quello di comparare le performance dei vari schemi di controllo adottati per comandare il sollevatore, piuttosto che verificare l'efficacia del controllo di stabilità della macchina. Infatti il controllo di stabilità svolge la sua funzione soprattutto nei casi in cui l'operatore volesse portare un carico in posizioni che si trovano oltre il limite di sicurezza, situazione che non è stata considerata in questi test dato che tutte le posizioni indicate erano raggiungibili, anche se alcune si trovavano ai limiti della zona di intervento del controllo e quindi potevano portare la macchina al ribalta-

mento se l'operatore non avesse prestato attenzione durante il movimento dalla posizione 2 alla posizione 3 di figura 4.1.

Per valutare l'efficacia dei vari metodi di comando del sollevatore è stato considerato come parametro caratteristico, almeno in queste prime analisi, il tempo impiegato dall'operatore per completare il raggiungimento di tutti i 3 i target.

Il calcolo del tempo è stato fatto considerando come istante di partenza il momento in cui l'operatore ha eseguito un movimento dell'attuatore di sollevamento o di estensione superiore all'1 % della corsa totale disponibile. La tabella 4.2 riporta i tempi di completamento del task riferiti alle prove di "stabilità", mentre nella tabella 4.3 sono riportati i valori per i test di "precisione".

Se si riportano i valori medi dei tempi in un istogramma, indicando anche le relative deviazioni standard, si ottengono gli istogrammi riportati in figura 4.5.

Operatore	RC	RC +cs	RC +cs +fb	L	L +cs +fb	HJ	HJ +cs+ fb
1	53.8	48.05	72.15	61.75	56.2	54.25	79.05
2	60.25	71.9	46.6	69.6	71.95	58.9	50.2
3	123.9	56.2	78.65	92.15	97.1	50.9	49.85
4	63.65	46.35	46.75	63.2	68.3	54.25	56.55
5	66.35	50.45	78.65	69.4	89.65	73.4	58.6
6	96.6	77.8	76.05	83.85	123.25	109.85	106.4
7	41.9	44.65	41.55	48.5	103	50.35	49.85
8	46.85	47.85	49.45	77.5	56.75	43.05	44.6
9	57.35	65.95	82.2	61.5	67.85	55.6	54.15
10	50.5	79.2	53	52.95	82.9	54.35	45.05

Tabella 4.2: Raccolta dei tempi (espressi in secondi [s]) impiegati dai vari operatori per completare l'esecuzione del task assegnato nel caso del test di "stabilità" (RC = schema tipo "Rate Control", L = schema tipo "Lans", HJ = schema tipo "Haptic Joy", +cs = con controllo di stabilità, +fb = con feedback sulla leva).

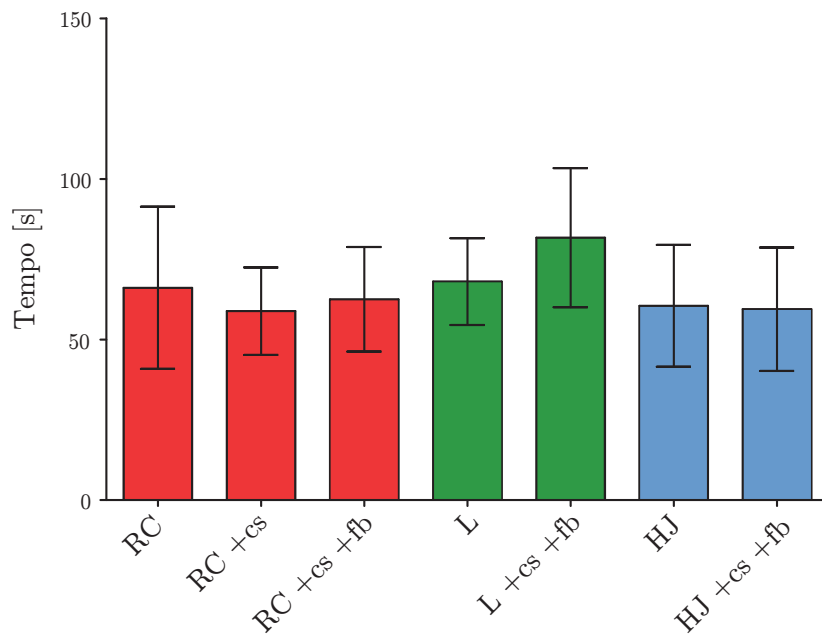
Operatore	Rate Control	Lans	Haptic Joy
1	35.3	37.4	37.2
(2)	76.45	50.6	31.9
(3)	40.2	30.85	70.4
4	26.8	30.85	45.05
5	35.9	44.05	43.1
6	31.7	69.1	39.85
7	28.5	28.5	32.35
8	25.3	44.1	26
9	30.8	47.35	31.4
10	40.2	70	50

Tabella 4.3: Raccolta dei tempi (espressi in secondi [s]) impiegati dai vari operatori per completare l'esecuzione del task assegnato nel caso del test di "precisione".

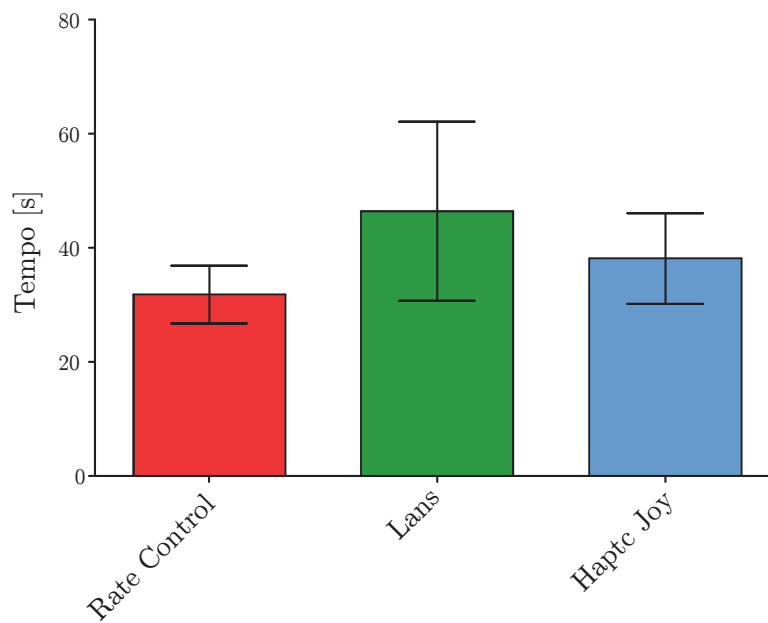
Da questi diagrammi si può notare che i valori medi dei tempi sono abbastanza simili (anche se allo schema di controllo tipo "Lans" sembrano essere associati tempi maggiori), in considerazione anche della considerevole deviazione standard che indica una rilevante dispersione di valori raccolti. Per poter quindi confrontare le serie di dati ottenuti, suddivise tra i test di "stabilità" e quelli di "precisione", si è fatto ricorso al test statistico denominato Wilcoxon Matched-Pairs Test. Questo tipo di test statistico è di tipo non parametrico (cioè non si basa su ipotesi stabilite a priori riguardanti le caratteristiche della popolazione di dati) e permette di confrontare due gruppi associati di dati. La procedura di test si basa sul calcolo delle differenze tra le coppie associate di dati e sulla successiva analisi di queste differenze. Il valore di P-value che viene fornito dal test permette di stabilire se effettivamente i due gruppi di dati appartengono a distribuzioni diverse e quindi effettivamente esiste una differenza tra le due strategie di controllo considerate¹.

Considerando i test di stabilità, si può notare come alcuni dati si discostino molto dall'andamento ottenuto con gli altri operatori; eseguendo una regressione lineare dei tempi calcolati si possono infatti ricavare i grafici riportati nelle figure

¹In questa analisi l'ipotesi nulla H_0 è che le due strategie di controllo siano equivalenti, mentre l'ipotesi alternativa H_1 è che le due strategie di controllo non siano equivalenti. Il valore di P-value fornito dal test statistico rappresenta la probabilità ottenuta dall'analisi dei dati che si ha di commettere un errore del primo tipo, cioè accettare l'ipotesi alternativa H_1 , quando in realtà è vera l'ipotesi nulla H_0 . Come valore di soglia α che si accetta di commettere un errore del primo tipo si è considerato il 5%, quindi per ritenere valida l'ipotesi alternativa si deve avere $P - value < 0.05$.



(a) RC = schema tipo “Rate Control”, L = schema tipo “Lans”, HJ = schema tipo “Haptic Joy”, +cs = con controllo di stabilità, +fb = con feedback sulla leva.



(b)

Figura 4.5: Rappresentazione tramite grafici a barre del tempo medio e della relativa deviazione standard dei tempi impiegati dai vari operatori per completare il task assegnato. La figura 4.5a mostra i dati relativi al test di “stabilità”, mentre la figura 4.5b quelli relativi al test di “precisione”.

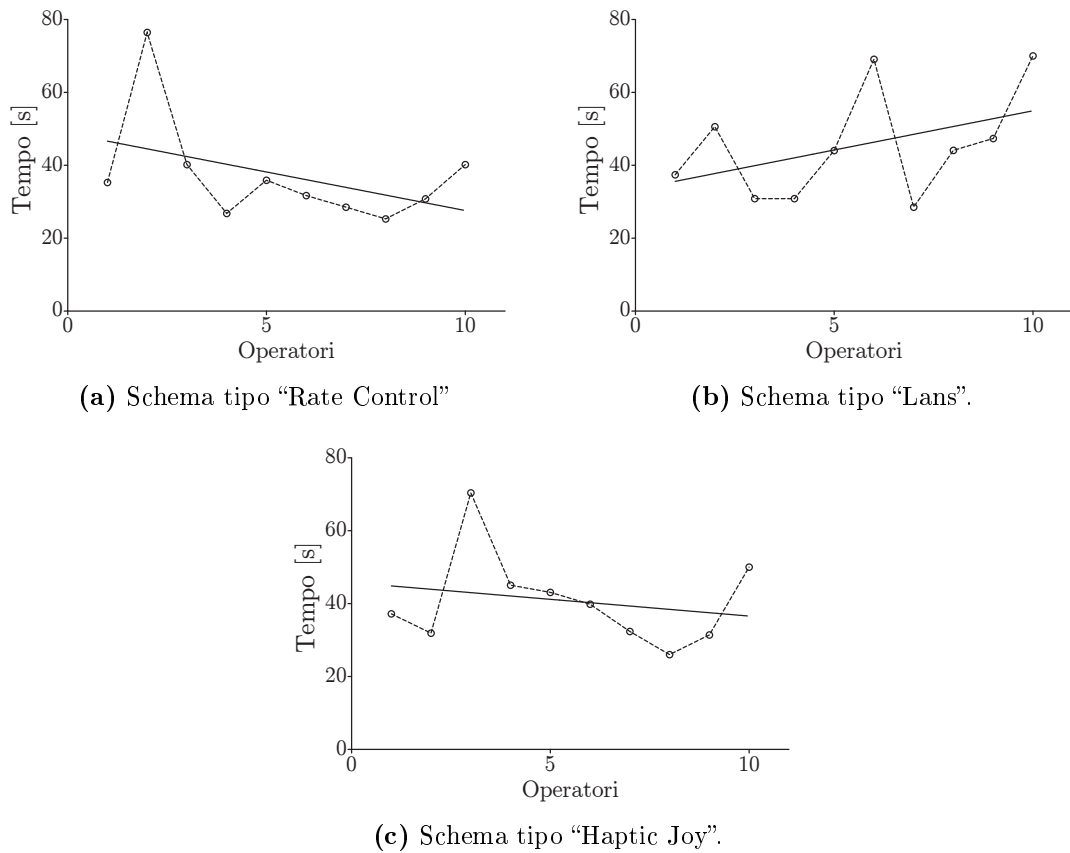


Figura 4.6: Regressioni lineari dei dati raccolti durante la prova di "precisione".

4.6a, 4.6b e 4.6c. Come si può notare nei grafici 4.6a e 4.6c i tempi riferiti rispettivamente all'operatore 2 e 3 si discostano evidentemente da quelli ottenuti per gli altri operatori, probabilmente a causa di una scarsa confidenza con il controllo adottato o per qualche altro problema insorto durante la prova. Data quindi la notevole difformità si è deciso di escludere questi due operatori dall'analisi statistica effettuata su questo set di dati..

Poiché il test statistico Wilcoxon Matched-Pairs Test opera su coppie di serie di dati, è necessario scegliere quali tipologie di schemi di controllo confrontare tra di loro. Considerando i test di "precisione" si possono quindi ad esempio verificare la sussistenza di differenze tra le tipologie di schemi riportate nella tabella 4.4.

Da questi dati si può vedere come ci sia effettivamente differenza significativa tra le diverse modalità di controllo, in particolare il controllo tipo "Rate Control" permette di ottenere tempi di esecuzione del task inferiori sia rispetto alla modalità "Haptic Joy" sia rispetto alla modalità "Lans", osservando i valori medi si può però vedere come il guadagno di tempo rispetto allo schema tipo "Lans" sia molto superiore.

	Haptic Joy	Haptic Joy	Lans
	vs	vs	vs
	Rate Control	Lans	Rate Control
P-value	0.0078	0.1484	0.0156
C'è differenza significativa tra le due serie? (P-value < 0.05)	Si	No	Si
Differenza tra valori medi [s]	6.31	-8.3	14.61

Tabella 4.4: Risultati del test statistico denominato Wilcoxon Matched-Pairs Test per le prove di “precisione”.

Per quanto riguarda invece il confronto tra gli schemi “Haptic Joy” e “Lans”, dato l’elevato valore del parametro P-value, non è possibile trarre una conclusione attendibile.

Nell’analisi delle prove di stabilità sono stati effettuati un numero limitato di test rispetto a quelli teoricamente possibili. I risultati che sono stati ottenuti sono riportati nella tabella 4.5. In questo caso i confronti effettuati tra gli schemi senza l’attivazione del controllo di stabilità non danno risultati significativi, mentre il confronto con il controllo di stabilità e il feedback sulla leva permette di dire che sia lo schema tipo “Rate Control” che quello tipo “Haptic Joy” prevalgono sullo schema tipo “Lans”, mentre tra questi due schemi non è possibile stabilire quale consente di ottenere i tempi di esecuzione dei task minori. Considerando inoltre la differenza tra i valori medi delle coppie di schemi si può notare che la riduzione di tempo con gli schemi tipo “Rate Control” o “Haptic Joy” rispetto allo schema tipo “Lans” è praticamente uguale. Ciò significa quindi che lo schema tipo “Haptic Joy” consente di ottenere (almeno nel caso dei test effettuati) prestazioni simili a quelle realizzate con il sistema di comando tipico dei sollevatori telescopici, cioè il “Rate Control”, fornendo però in più la corrispondenza tra la posizione della leva del master e la posizione del braccio dello slave. La stessa corrispondenza la si ottiene con lo schema tipo “Lans”, a scapito però di tempi di esecuzione molto superiori. Rimane però da verificare se questa caratteristica può essere efficacemente utilizzata dagli operatori nell’ambiente di lavoro reale.

	RC	L	RC	RC +cs +fb	RC +cs +fb	L +cs +fb
	vs	vs	vs	vs	vs	vs
	L	HJ	HJ	L +cs +fb	HJ +cs +fb	HJ +cs +fb
P-value	0.2158	0.1934	1	0.0371	0.8457	0.0273
C'è differenza significativa tra le due serie? (P-value < 0.05)	No	No	No	Si	No	Si
Differenza tra valori medi [s]	-1.93	7.56	5.63	-19.19	3.08	22.27

Tabella 4.5: Risultati del test statistico denominato Wilcoxon Matched-Pairs Test per le prove di “stabilità” (RC = schema tipo “Rate Control”, L = schema tipo “Lans”, HJ = schema tipo “Haptic Joy”, +cs = con controllo di stabilità, +fb = con feedback sulla leva).

In figura 4.7 sono riportate, come esempio, le traiettorie seguite dall’operatore 1 nel corso del test, per tre tipologie diverse di schema di controllo. In tutti i 3 casi si può vedere come nel passare dalla posizione T2 alla posizione T3 l’operatore abbia preferito far rientrare lo sfilo molto più di quanto sarebbe servito per eseguire il movimento nel più breve tempo possibile, che avrebbe infatti implicato un movimento dell’end-effector lungo la linea verticale che collega i due target. Questo comportamento è dovuto principalmente a due fattori: da un lato il fatto che è più semplice agire prima sull’attuatore di sollevamento per dirigere il braccio nella direzione del bersaglio e poi agire sul comando di estensione per completare la manovra, d’altra parte questo tipo di manovra è più sicura perché durante lo spostamento delle forche verso il basso il baricentro della macchina viene mantenuto distante dal limite di ribaltamento. Sfruttando gli schemi di controllo che sono stati sviluppati l’operatore avrebbe potuto passare dalla posizione T2 alla posizione T3 agendo solo sull’attuatore di sollevamento in quanto la lunghezza dell’estensione del braccio sarebbe stata regolata automaticamente dallo schema di controllo per mantenere la macchina in sicurezza, riducendo quindi il tempo di esecuzione del task assegnato. Questo comportamento non è però visibile nei test che sono stati effettuati perché ai vari operatori non è stata data la possibilità di abituarsi fino in fondo alla presenza del controllo di stabilità, quindi anche nelle prove in cui questo era attivo essi hanno seguito traiettorie simili a quelle

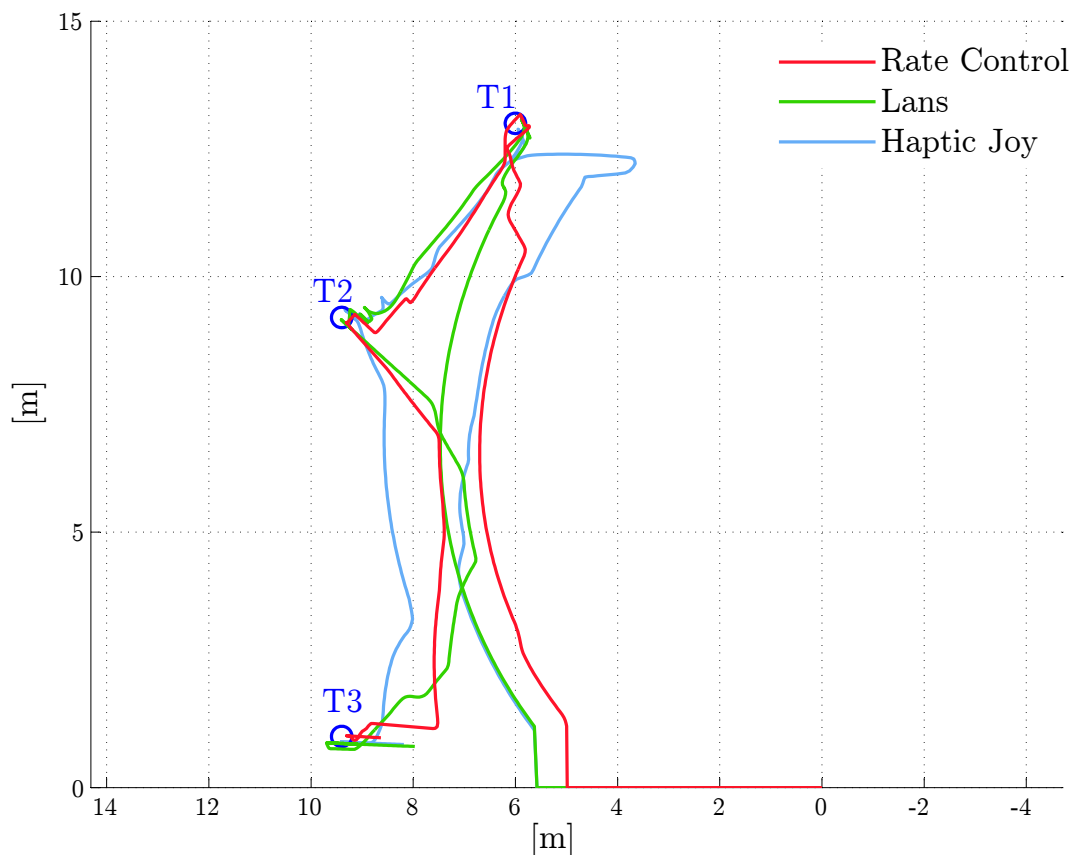


Figura 4.7: Traiettorie seguite dall’end-effector del sollevatore telescopico durante la prova di stabilità eseguita dall’operatore 1. La linea di colore rosso indica l’utilizzo dello schema tipo “Rate Control”, la linea verde lo schema tipo “Lans” e la linea azzurra lo schema tipo “Haptic Joy”, in tutti i casi era disattivato sia il controllo di stabilità che il feedback sulla leva..

di figura 4.7. Per poter valutare quindi il guadagno di tempo che si può ottenere sfruttando il controllo di stabilità automatico dovranno essere fatti altri test che prevedano l’impiego di operatori maggiormente addestrati.

Durante l’esecuzione delle prove di stabilità si sono avuti alcuni casi di ribaltamento della macchina, riportati nella tabella 4.6. Come si può vedere tutti i casi di ribaltamento si sono verificati quando il controllo di stabilità era disattivato e inoltre quasi la totalità è avvenuta con lo schema di controllo tipo “Lans”, che, come visto dalle analisi statistiche precedenti, è anche quello che si è dimostrato meno performante.

Operatore	RC	RC +cs	RC +cs +fb	L	L +cs +fb	HJ	HJ +cs+ fb
1	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	1	—	—	—
3	—	—	—	—	—	1	—
4	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	1	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	2	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—

Tabella 4.6: Indicazione dei casi di ribaltamento avvenuti nel corso del test di “stabilità” (RC = schema tipo “Rate Control”, L = schema tipo “Lans”, HJ = schema tipo “Haptic Joy”, +cs = con controllo di stabilità, +fb = con feedback sulla leva).

Al termine dei test sono stati inoltre raccolti i pareri degli operatori riguardo all'utilizzo dei vari schemi. Dall'analisi di quanto scritto si è rilevato che, come evidenziato dai test statistici, lo schema “Rate Control” è quello più apprezzato per via della sua maggiore intuitività e analogia con i sistemi già esistenti, anche il controllo tipo “Haptic Joy” ha ricevuto buone valutazioni, anche se si è rilevato più difficoltoso da utilizzare perché necessita di un periodo di apprendimento maggiore rispetto al “Rate Control”. Per quanto riguarda invece il controllo tipo “Lans” sono stati forniti tutti pareri negativi a causa della difficoltà di ottenere un movimento regolare, dovuto al fatto che la leva si muove senza nessun feedback se il sollevatore si mantiene all'interno dei limiti di sicurezza (o il controllo di stabilità è disattivato).

4.3 Visualizzazione delle prove

Una volta effettuate le prove è stato necessario realizzare un'utilità in grado di fornire nel dettaglio il comportamento di ogni grandezza in gioco nel sistema all'interno della singola prova, per svariati motivi:

- evidenziare eventuali punti critici

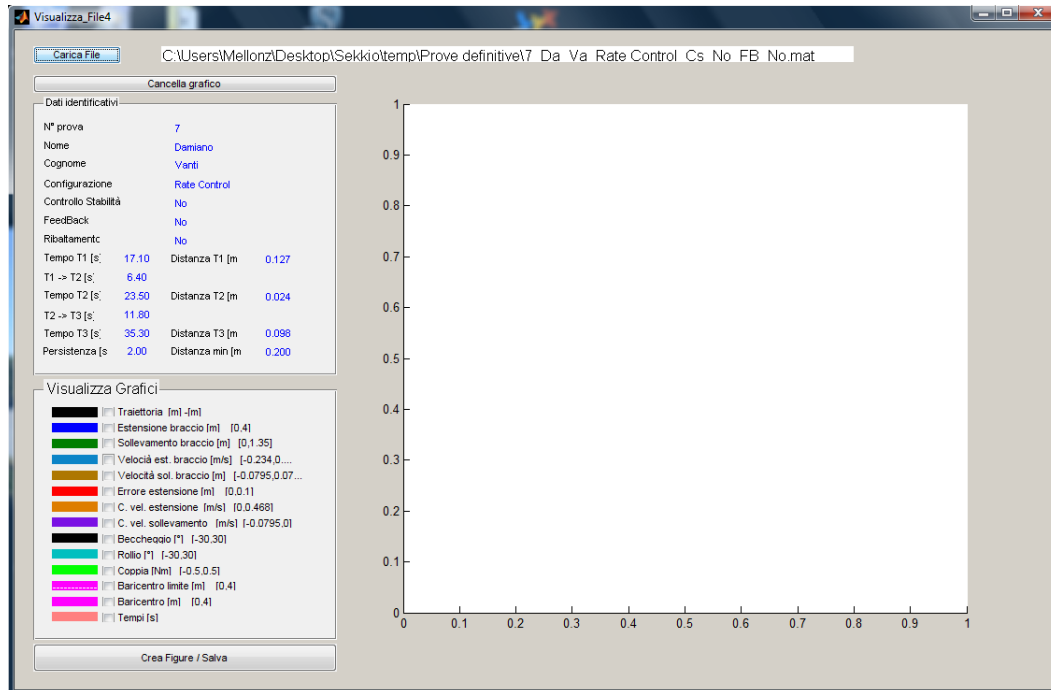


Figura 4.8: Interfaccia grafica

- scoprire correlazioni tra le grandezze
- fornire spunti per ottimizzare le tarature
- seguire l'evoluzione delle grandezze del tempo
- diagnosticare malfunzionamenti
- dare una visione globale ed intuitiva del funzionamento

Per questi ed altri motivi è stata realizzata un'interfaccia grafica, in grado di caricare tutte le informazioni dei file .mat prodotti durante la procedura di test, il cui aspetto si può vedere in questa pagina.

Attraverso il pulsante “Carica File” è possibile selezionare i dati relativi alla prova desiderata e caricarli.

Nella sezione “Dati identificativi” appariranno le informazioni relative alla prova, ovvero il numero progressivo, il nome del soggetto, tipologia, parametri adottati e tempi.

Nella sezione “Visualizza grafici” è possibile selezionare le grandezze di interesse che si vogliono evidenziare, come ad esempio la traiettoria seguita, come si può vedere nella pagina successiva

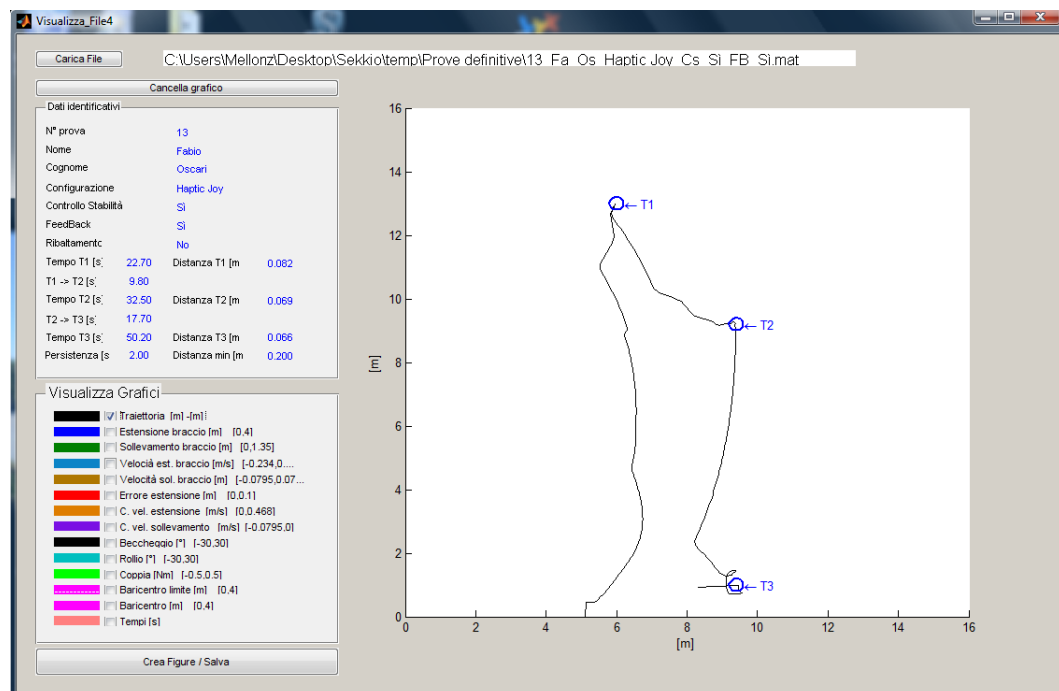


Figura 4.9: Traiettorie

In questo caso il grafico presenta ovviamente una scala in metri, ed i cerchi che indicano i bersagli hanno una grandezza proporzionale a quella effettivamente adottata per la zona di bersaglio, in modo da far apprezzare visivamente l'entità dell'errore ritenuto accettabile.

Un altro caso può presentarsi nel momento in cui si voglia rappresentare delle grandezze nel dominio del tempo, come velocità, forze, segnali di controllo e via dicendo.

In questo caso il grafico presenta come variabile indipendente il tempo, da 0 secondi all'istante di termine della prova, e come variabile indipendente la variazione percentuale della grandezza d'interesse, tra un minimo ed un massimo indicati in legenda. Questa scelta è stata fatta in quanto le diverse grandezze fisiche sono numerose e sarebbe stato difficile indicarle simultaneamente. In ogni caso si possono distinguere in base ai colori e ricavare con un semplice calcolo.

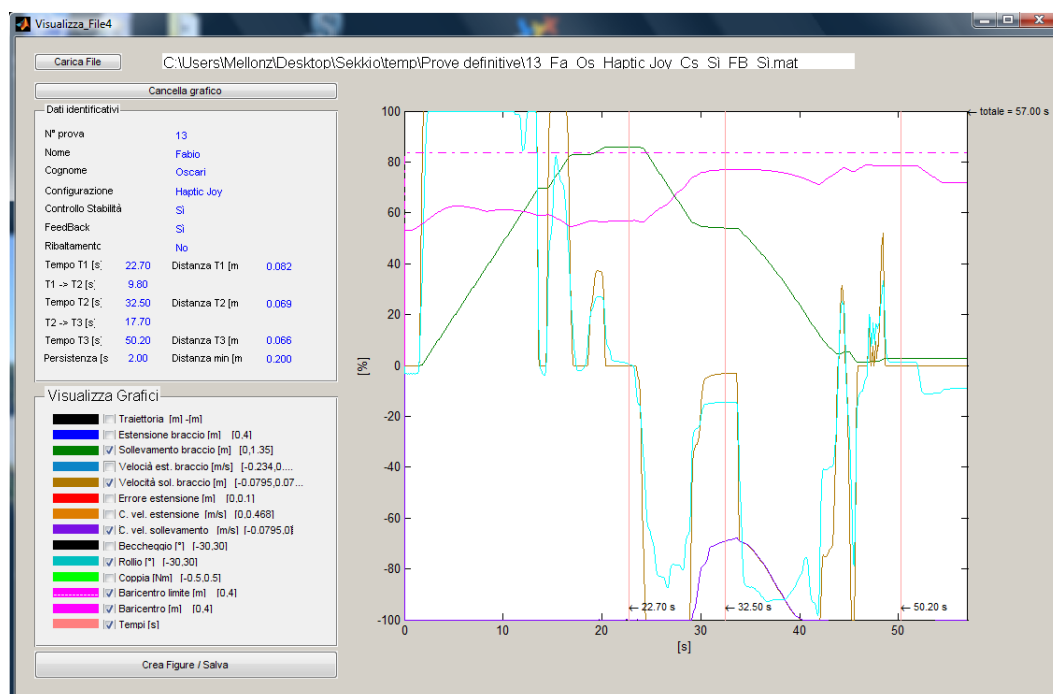


Figura 4.10: Dominio del tempo

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era quello di sviluppare un sistema di controllo per sollevatore telescopico in grado di garantire la stabilità in fase operativa, maneggevolezza nell'utilizzo e ritorni di forza utili all'operatore.

Nel fare questo si è prima di tutto dovuto agire con un lavoro di modellizzazione, in modo da rendere il sistema reale trattabile dall'elaboratore.

In primo luogo si è calibrato il joystick, in modo tale da poter avere riferimenti sul comando dell'operatore certi ed esenti, nelle tolleranze previste, da errore. Il problema è stato superato con successo introducendo livelli intermedi di software in grado di trattare i segnali di ingresso, tenendo conto della costruzione meccanica del joystick.

In seguito si è passato a realizzare i vari schemi di utilizzo, scegliendo le grandezze da mettere in relazione, ottenendo vari tipi di comando, con i loro pregi e difetti.

A questo punto si è presentato il problema di fornire il ritorno di forza, una questione delicata, in quanto sottoposta a parametri stringenti. Il problema è stato risolto da prima teoricamente, con i classici schemi in retroazione, e poi dal punto di vista empirico, in quanto, andando ad agire su un meccanismo a diretto contatto con l'operatore, oltre alle prestazioni, era necessario garantire sicurezza nell'utilizzo, cosa non banale, a causa della coppia disponibile in grado di provocare danni, e del fatto che il comportamento dell'utilizzatore non è prevedibile a priori. Questa fase è stata superata tramite un lavoro di taratura specifica per il joystick adottato.

Un altro problema è stato quello di garantire la continuità delle funzioni della macchina anche qualora fosse insorta instabilità. Questa fase è stata affrontata prevedendo dei segnali di controllo i quali entrassero in funzione gradualmente, evitando sollecitazioni indesiderate.

La fase di test ha fornito le conclusioni di maggior interesse. Si possono infatti valutare quantitativamente le prestazioni del sistema. Cosa interessante, il sistema

anti-ribaltamento non ha mai fallito(quando attivato).Lo schema di controllo più intuitivo é stato il rate control,quello meno performante il LANS.

La procedura di test si presta alla realizzazione rapida di nuvi tipi di test.

Si puo' dire in definitiva che gli obbiettivi prefissati del lavoro sono stati raggiunti,almeno su simulatore.

Appendice A

Calcolo del baricentro

Le formule per il calcolo del baricentro totale sono state ricavate a partire dal modello matematico precedentemente implementato in MATLAB (vedi [5]) usato per la creazione del modello 3D. Tali formule sono necessarie per lo sviluppo del controllore automatico per la stabilità (vedi 5.3.1). La macchina è stata considerata come un sistema di più corpi rigidi interconnessi rappresentati dai suoi elementi base: la base, la cabina, i cilindri idraulici dell'attuatore di sollevamento, i tre sfilì del sollevatore e le relative forche dove verrà poi posto il carico. Per fare l'analisi cinematica del sollevatore, in accordo con la notazione di Denavit-Hartenberg, sono stati fissati gli opportuni sistemi di riferimento che hanno permesso di ricavare i parametri riportati in tabella 2.1, dove L_2 , L_3 , L_4 , k_2 , k_4 , k_5 , a_1 , a_2 , a_5 , a_6 , a_7 sono costanti geometriche, mentre s_2 (attuatore idraulico di sollevamento), s_4 (attuatore idraulico di estensione), (rotazione della cabina), 1 (inclinazione dell'attuatore idraulico di sollevamento rispetto all'asse longitudinale della macchina (X_1)), b_3 (inclinazione del braccio sollevatore rispetto all'asse longitudinale della macchina (X_1)) e b_6 (inclinazione delle forche rispetto all'asse longitudinale della macchina (X_1)) sono variabili.

A.1 Stima dell'inclinazione de braccio

Per calcolare la posizione del baricentro della macchina, è necessario prima trovare un'espressione che esprima il valore dell'angolo di inclinazione ($[\text{rad}]$) del braccio della macchina rispetto all'asse longitudinale del veicolo in funzione della corsa s [m] dell'attuatore di sollevamento. A partire dalle equazioni che determinano la statica e la dinamica della macchina, è stato ricavato un polinomio di 4o grado che permette di calcolare tale relazione in maniera approssimata. I coefficienti di tale polinomio sono stati ricavati utilizzando la funzione `polyfit` di MATLAB

$[T_{i,i-1}]$	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	ϑ_i
$[T_{2,1}]$	0	a_1	L_2	$\pi + \gamma$
$[T_{3,2}]$	$-\frac{\pi}{2}$	a_2	$-L_3$	$\beta_1 + \frac{\pi}{2}$
$[T_{4,3}]$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$k_2 + s_2$	0
$[T_{5,4}]$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$-L_3$	$-\pi + \beta_1 - \beta_3$
$[T_{6,5}]$	$-\frac{\pi}{2}$	a_5	$-k_4 + s_4$	π
$[T_{7,6}]$	0	a_6	$L_4 + k_5 + s_4$	0
$[T_{8,7}]$	$\frac{\pi}{2}$	a_7	0	$\frac{\pi}{2} - \beta_3 + \beta_6$

Tabella A.1: Parametri di Denavit-Hartenberg.

che permette di calcolare i coefficienti del polinomio interpolatore di una data funzione una volta fissato il grado del polinomio desiderato. Definendo B come:

$$B = [B(1) + B(2) + B(3) + B(4) + B(5)]$$

con:

$$\beta = B(1)s^4 + B(2)s^3 + B(3)s^2 + B(4)s + B(5)$$

gli elementi di B sono ricavabili con il seguente codice MATLAB:

```
for ss = 1:length(Vett_s) theta2 = acos(((Vett_s(ss) +
macchina.data.s0)^2 - macchina.data.r^2 - macchina.data.a4^2)/(2 *
macchina.data.r *macchina.data.a4)) + macchina.data.bc; Beta(ss) =
(pi + macchina.data.gam - theta2); end B = polyfit(Vett_s,Beta,4);
```

Le variabili e i parametri presenti nel codice sono:

- Vett_s: vettore contenente valori progressivi della corsa dell'attuatore di sollevamento
- theta2: angolo di appoggio per il calcolo di Beta
- Beta: angolo di inclinazione del braccio telescopico rispetto all'asse longitudinale della macchina
- macchina.data.s0: lunghezza dell'attuatore di sollevamento completamente ritratto
- macchina.data.r (contenuti nella struttura dati macchina, vedi 5.1)

- r ruote: il raggio [m] delle ruote della macchina
- $M_{veicolo}$: massa [kg] del sollevatore telescopico esclusa la massa del carico
- $p1$: distanza [m] (lungo l'asse longitudinale del braccio) del centro di rotazione C del braccio dall'origine del sistema di riferimento 8 (tool) con la corsa di estensione $e = 0m$
- $p2$: distanza [m] (ortogonale all'asse longitudinale del braccio) del centro di rotazione C del braccio dall'origine del sistema di riferimento 8 (tool) con la corsa di estensione $e = 0m$

mentre le variabili sono:

- e : estensione del sollevatore telescopico
- s : posizione angolare del sollevatore telescopico [rad]
- W : massa del carico [Kg]

Il calcolo della posizione del baricentro del carico é stato effettuato rispetto al sistema di riferimento assoluto della macchina. Per fare ciò é stato considerato un vettore posizione il cui punto di applicazione corrisponde all'origine della terna di riferimento del tool (forche) con i seguenti parametri:

- ρ_{hw} : intensità del vettore che rappresenta la distanza del baricentro del carico rispetto all'origine della terna di riferimento del tool
- ϕ_{iw} : angolo di inclinazione [deg] del vettore rispetto all'asse x della terna di riferimento del tool

Da cui si ottiene :

$$XGw = \rho_{hw} * \cos(\phi + \phi_{iw}) + (p1 + 2 * e) * \cos(\beta) + p2 * \sin(\beta) - data.xc + 0.2885$$

Ipotizzando che la macchina sia priva di carico:

$$XGv = \sin(\beta) * (Ax * e + Bx) + \cos(\beta) * Cx + Dx$$

dove Ax , Bx , Cx e Dx sono delle costanti ottenute in MATLAB ed esprimono:

- Ax : funzione della massa del carico W [kg] e della corsa dell'attuatore di estensione e [m]
- Bx : funzione della massa del carico W [kg]

- Cx: rappresenta la posizione lungo la coordinata x del baricentro del veicolo senza braccio
- Dx: questo parametro tiene conto dell'inclinazione delle forche f a braccio fermo e della massa del carico

Sostituendo a tali parametri le loro espressioni relative alla nostra macchina, otteniamo:

$$XGv = (\cos(\beta) * (0.3138 * e + 0.93342) + \sin(\beta) * 0.14421 + 0.85506)$$

La stima della posizione totale si ottiene come:

$$X_{Gtot_st} = (ZGv * Mveicolo + ZGw * W) / (Mveicolo + W)$$

Bibliografia

- [1] A. Biondi, “Stabilità statica e dinamica di sollevatore telescopico,” Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2005.
- [2] M. Pozzan, “Modellazione cinematica e dinamica di macchine operatrici pesanti,” Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2006-2007.
- [3] M. Zaroni, “Modellazione dinamica di macchine operatrici,” Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2006-2007.
- [4] G. Zennaro, “Progettazione di joystick aptico a due gradi di libertà,” Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2006-2007.
- [5] G. Rosati, A. Biondi, S. Cenci, and A. Rossi, “A haptic system to enhance stability of heavy duty machines,” in Proceedings of IMECE 2008, Boston, Massachusetts, 2008, pp. 1–10.
- [6] S. Cenci, G. Rosati, D. Zanotto, F. Oscari, and A. Rossi, “First test results of a haptic tele-operation system to enhance stability of telescopic handlers ,” In Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2010-25305, Istanbul, Turkey, July 12-14 2010
- [7] G. Rosati, A. Biondi, A. Cenci, A. Rossi, and G. Boschetti, “A haptic system to enhance stability of heavy duty machines ,” In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2008, Boston, MA, USA, Oct 31 - Nov 6 2008
- [8] G. Rosati, A. Biondi, G. Boschetti, and A. Rossi, “Real-time estimation of the telescopic handler center of mass ,” In Proceedings of the 12th IFToMM World Congress, Besancon, France, June 18-21 2007

- [9] A. Rossi, A. Biondi, S. Cenci, and G. Rosati, "Development of a telescopic handler simplified model ," In Proceedings of AIMETA 2007, Brescia, Italy, September 11-14 2007