



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

Tesi di Laurea Magistrale

Strategie di controllo per l'utilizzo di robot mobili collaborativi nella guida manuale

Relatore: Chiar.mo Prof. Giovanni Boschetti

Laureando: Nicolò Rader
M.1179530

15 luglio 2022

Ringrazio il Prof. Giovanni Boschetti
per avermi dato l'opportunità di sviluppare questa tesi.
Ringrazio Riccardo Minto per il prezioso aiuto dato in laboratorio.
Dedico un ringraziamento particolare alla mia famiglia e ai miei amici
per essermi stati accanto durante questi anni di studio.

Prefazione

Per molti anni, i robot sono stati utilizzati nell'ambiente industriale in spazi separati e dotati di barriere protettive per garantire la sicurezza dell'uomo. Questa filosofia sta recentemente cambiando grazie all'impiego di nuove tecnologie che permettono ai robot di lavorare fianco a fianco con gli umani ed interagire con loro non solo in ambito lavorativo ma anche in spazi pubblici, comportando notevoli benefici per le aziende e i lavoratori.

La mobilità è un elemento chiave per questa evoluzione della robotica, i robot mobili, infatti, permettono nuovi modelli di business e di organizzazione aziendale in molti settori industriali. Una crescita rilevante si sta registrando rispetto ai robot mobili autonomi, i quali possono navigare e svolgere diverse funzioni autonomamente nei settori industriali e di servizio.

Questo nuovo aspetto della robotica comporta però che non sia più presente una separazione tra robot e uomo, questo rende necessaria una particolare attenzione alla sicurezza nell'interazione uomo-robot e la possibilità di cooperare per raggiungere il risultato voluto.

In questo ambito si sviluppa il seguente elaborato, con lo scopo di fornire una panoramica dello stato dell'arte nella robotica mobile e nella robotica collaborativa, combinando i vantaggi forniti da queste tecnologie per ottenere un'interazione tra uomo e robot che permetta la guida manuale di quest'ultimo. Verranno illustrati il robot utilizzato (sia nella parte mobile che in quella manipolativa), le strategie di controllo adottate per ottenere una guida manuale intuitiva e sicura sia quando si vogliono coprire lunghe distanze sia quando viene utilizzata per brevi spostamenti, la programmazione dell'applicazione con una focalizzazione sui metodi implementati per il calcolo dei riferimenti di velocità e posizione e sulla strategia implementata per evitare collisioni del robot con l'ambiente. I risultati ottenuti saranno analizzati e confrontati per verificare il raggiungimento delle prestazioni volute dando, infine, alcuni spunti per sviluppi futuri legati a questo elaborato.

L'autore.

Indice

Prefazione	III
1 Robot mobili	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Robot mobili oggi	2
1.3 Caratteristiche degli AMR	4
1.3.1 Autonomia	4
1.3.2 Navigazione	5
1.3.3 Gestione flotta	5
1.3.4 Modelli computazionali in locale e remoto	6
1.3.5 Locomozione	6
1.3.6 Materiali	6
1.4 AMR nei luoghi di lavoro	8
1.4.1 Produzione	8
1.4.2 Logistica	9
1.5 Sicurezza e protezione	11
2 Robotica collaborativa	13
2.1 Collaborazione uomo-robot	13
2.2 Modalità di interazione	14
2.3 Interazione fisica	15
2.3.1 Controllo di ammettenza	16
2.4 Standard di sicurezza	19
3 KMR iiwa 14 R820 omniMove	23
3.1 Panoramica	23
3.2 KMP 200 omniMove	24
3.2.1 Direzioni di marcia della piattaforma	24
3.2.2 Ruota Mecanum	24
3.3 LBR iiwa 14 R820	27
3.3.1 Rilevazione forze	27
3.4 KUKA Sunrise.OS	29

4	Definizione applicazione	31
4.1	Utilizzo della guida manuale	36
5	Strategie di controllo	37
5.1	Modello proporzionale	37
5.2	Modello con oscillatore semplice smorzato	38
5.2.1	Oscillatore semplice smorzato	39
5.2.2	Discretizzazione	41
5.3	Controllo di posizione	43
6	Implementazione software in ambiente KUKA	45
6.1	Struttura	45
6.2	Metodi per la guida manuale	47
6.2.1	forceMoveProp()	47
6.2.2	forceMoveOsc()	47
6.2.3	devSpost()	48
6.3	Metodi ausiliari	48
6.3.1	zero()	48
6.3.2	laser()	49
7	Risultati sperimentali	51
7.1	Controllo di ammettenza	51
7.1.1	Modello proporzionale	51
7.1.2	Modello con oscillatore semplice smorzato	53
7.1.3	Confronto modelli	56
7.2	Controllo di posizione	58
	Conclusioni	61
	Bibliografia	63
	Elenco delle tabelle	65
	Elenco delle figure	66

Capitolo 1

Robot mobili

1.1 Introduzione

La robotica mobile è un insieme di tecnologie che permette nuovi modelli di business industriale, incrementandone l'efficienza, la sostenibilità e rendendo il lavoro più sicuro e remunerativo in una vasta gamma di settori industriali.

Si sta verificando un rapido sviluppo dei robot mobili autonomi (AMR: Autonomous Mobile Robots) che sono in grado di navigare ed eseguire altre funzioni autonomamente; possono consistere in una base mobile, una base mobile con braccio robotico o un sistema mobile provvisto di specifica interfaccia utente. Gli AMR stanno modificando il modo di lavorare in diversi settori industriali chiave:

- **Produzione:** in ambienti con alto mix e bassi volumi produttivi, permettono di adattare rapidamente la produzione alla domanda ed inoltre forniscono dati che possono essere usati per migliorare i singoli processi e stabilire una visione in real-time della produzione.
- **Logistica:** vengono utilizzati per trasportare beni nei magazzini; si stanno sviluppando hardware e software che permettono agli AMR di identificare e manipolare correttamente forme non standard e sono in corso studi sulla consegna ai destinatari nell'“ultimo miglio”, ossia l'effettivo recapito dell'oggetto al destinatario.
- **Salute:** utilizzati nel trasporto di materiali e farmaci negli ospedali e nelle strutture di cura, nella pulizia e disinfezione. Ci sono sviluppi significativi riguardo a robot per l'assistenza agli operatori sanitari.
- **Vendita:** per evasione degli ordini, inventario, servizio clienti.
- **Esercizi pubblici:** utilizzati in aeroporti, hotel e centri commerciali come robot informativi, per consegne (servizio in camera), pulizia, disinfezione e sicurezza.

Gli AMR fungono spesso da collante tra parti di un processo che altrimenti sarebbero scollegate, generando dati che possono essere utilizzati per valutarne le prestazioni in real-time. Tra i benefici si riscontrano minori sprechi, maggiore efficienza, migliore qualità e maggiore sicurezza; permettono inoltre nuovi modelli di business nella produzione e nella logistica che aiutano le aziende a rimanere competitive in un ambiente con bassi volumi ed alto mix produttivo.

Gli sviluppi hardware e software permettono rapidi progressi rispetto ad autonomia, navigazione, visione e sensoristica, gestione delle flotte, modelli computazionali in locale e remoto (edge/cloud), locomozione, utilizzo di materiali più leggeri e robot skin, riducendo i costi e aumentando la funzionalità.

1.2 Robot mobili oggi

Sebbene gli studi sulla mobilità autonoma siano iniziati negli anni '40, i robot mobili autonomi hanno cominciato ad essere commercializzati solo nell'ultimo decennio. Questo è dovuto principalmente alla disponibilità di sistemi computazionali più evoluti ed economici che hanno permesso un rapido sviluppo di sensori, sistemi di visione e tecnologie di analisi che permettono ai robot di percepire e rispondere in modo appropriato all'ambiente in cui si trovano in tempo reale. I robot mobili possono muoversi in diversi ambienti, a terra, in acqua e in aria utilizzando vari metodi di locomozione. Una descrizione dei vari tipi di robot è data in Tabella 1.1.

Il settore dei robot mobili in più rapida espansione riguarda i robot mobili autonomi (AMR). Un AMR può essere costituito da una piattaforma o base mobile autonoma che può essere caricata con beni da trasportare, essere equipaggiata con strumenti che permettono di avere ulteriori funzioni oppure essere un sistema mobile completo composto da una base mobile, un'interfaccia utente e funzionalità specifiche.

Le basi mobili, con o senza ulteriori strumenti, prevalgono in produzione, logistica e sanità. Utilizzate per il trasporto di materiali nelle fabbriche, nei magazzini e negli ospedali possono sostituire o essere utilizzate insieme agli AGV (Automated Guided Vehicles) i quali dipendono da percorsi prestabiliti ed altri riferimenti esterni e non possono mappare autonomamente i loro percorsi. Gli AMR possono mappare l'ambiente in cui si trovano (o aggiornare una mappa precaricata) e trovare la loro posizione in essa, possono percepire e reagire agli ostacoli (ad esempio rallentando o fermandosi) e pianificare un percorso alternativo per raggiungere la loro destinazione.

Mentre gli AGV operano tradizionalmente in contesti industriali dove le interazioni con essi sono limitate al personale addestrato, gli AMR sono già presenti sia in contesti industriali che in ambienti dove è previsto il contatto con un pubblico generico (robot informativi) o non può essere evitato (robot all'interno degli ospedali).

La maggior parte degli AMR è dotata di ruote ed è destinata all'utilizzo in ambienti chiusi, mentre quando l'utilizzo previsto è quello di ispezione, i robot possono essere dotati di "gambe" per poter salire e scendere le scale e muoversi su terreni irregolari.

Tipo robot	Definizione
Autonomous Mobile Robots (AMR)	Piattaforma mobile che attraversa l'ambiente di lavoro autonomamente, questo richiede l'abilità di rilevare gli ostacoli e di modificare il percorso predefinito pianificato in ambiente libero e privo di ostacoli in modo da evitare collisioni. • Con o senza strumenti o manipolatori • Sistema robotico completo (piattaforma, interfaccia utente e funzionalità specifiche) ad esempio: – Robot informativi – Robot per la sicurezza – Robot per assistenza sanitaria
Automated Guided Vehicle (AGV)	Piattaforma mobile automatica che attraversa l'ambiente di lavoro automaticamente lungo dei percorsi predefiniti (in modo fisico o virtuale) evitando collisioni.
Robot mobile (ISO 8373)	Robot in grado di muoversi sotto il proprio controllo, può essere una piattaforma mobile con o senza manipolatore.
Robot di servizio (ISO 8373)	Robot che può eseguire operazioni utili per gli umani ad esclusione delle applicazioni di automazione industriale.

Tabella 1.1: Definizioni robot mobili.

1.3 Caratteristiche degli AMR

1.3.1 Autonomia

L'autonomia negli AMR fa riferimento soprattutto alla navigazione. Gli AMR possono muoversi negli stabilimenti e nei magazzini senza il bisogno di seguire dei percorsi fissi, si fermano se incontrano un ostacolo e ripianificano il loro percorso al volo. I robot mobili tradizionali eseguono operazioni in accordo con programmi predefiniti che assicurano elevate precisione e velocità ma non forniscono nessun dato e non permettono nessun adattamento all'ambiente in cui si trovano e al loro stato interno.

I robot mobili devono funzionare efficacemente e in sicurezza in ambienti con un elevato grado di incertezza. Questa necessità viene soddisfatta sviluppando dei modelli per ottenere le adeguate risposte agli input forniti dai sensori di cui sono equipaggiati (come fermarsi se si trova ad una certa distanza da un oggetto). A livello "base" (ma comunque complesso), i robot mobili possono spostarsi da un punto A ad un punto B riprogrammando il loro percorso se incontrano un ostacolo. Molte ricerche stanno studiando come fornire ai robot un' "intelligenza semantica" in modo da poter interpretare ciò che vedono e di conseguenza agire in modo appropriato. L'intelligenza semantica si basa su algoritmi probabilistici che elaborano in tempo reale la migliore azione da eseguire in base alle informazioni disponibili.

Negli scenari dell'automazione nei quali i robot comunicano con altri macchinari e software coinvolti nel processo produttivo, possono essere usati dei modelli probabilistici per stabilire che azioni compiere, e in quale ordine, basandosi sullo stato dell'ambiente in tempo reale; ad esempio il robot può essere inizialmente inviato per il ritiro di un pezzo da una cella di produzione ma potrebbe cambiare azione da eseguire se riceve l'informazione che il pezzo nella cella non è ancora pronto per il ritiro. Questa evoluzione negli algoritmi sta espandendo il range di azioni che gli AMR possono eseguire e continuerà nei prossimi anni.

L'idea di aumentare l'autonomia solleva tipicamente preoccupazioni riguardo la sicurezza dell'uomo (o degli oggetti) lungo il percorso del robot mobile o in contatto diretto con esso. Se non si conosce l'azione che il robot sta per eseguire, perché è in grado di determinare le sue azioni al volo e senza un input umano, come si può sapere se questa è sicura? È importante sottolineare che un'applicazione per un AMR è composta da un mix di algoritmi, alcuni deterministici (*if x, do y*), altri probabilistici (*cos'è più probabile sia vero in base alle informazioni ottenute e qual'è l'azione più appropriata da eseguire per raggiungere l'obiettivo in relazione a tali informazioni*) ai quali è applicata una gerarchia per stabilire quale ha la precedenza. Ad esempio, se un algoritmo deterministico dichiara "se un oggetto è più vicino di una certa distanza prefissata, allora ferma il robot" avrà sempre la precedenza rispetto ad un algoritmo probabilistico. Gli algoritmi deterministici garantiscono l'affidabilità e la sicurezza che sono strettamente legate alle applicazioni mobili autonome, questi algoritmi devono inoltre essere

eseguiti sempre localmente nel robot in modo da garantire che possa operare in sicurezza anche nel caso di un'interruzione della connessione alla rete.

1.3.2 Navigazione

La navigazione autonoma, ovvero l'abilità di un robot di mappare l'ambiente ed eseguire un percorso da un punto A ad un punto B, adattando il percorso in real-time se incontra degli ostacoli, è fondamentale per gli AMR. La navigazione autonoma si basa su algoritmi di simultanea mappatura e localizzazione (SLAM: Simultaneous Localization And Mapping) sviluppati a partire dagli anni '80. Gli algoritmi SLAM costruiscono una mappa dell'ambiente circostante al robot e simultaneamente ne determinano la posizione in essa basandosi sui dati ricevuti dai sensori. Poiché qualsiasi tecnologia per determinare la posizione ha dei limiti (ad esempio in termini di distanza misurata e di affidabilità in diverse condizioni variabili come nebbia o alte temperature), molte applicazioni SLAM combinano dati di più sorgenti inclusi LiDAR (Light Imaging Detection and Ranging), radar, GPS, odometria (basata sulla rotazione delle ruote) e ultrasuoni; la tecnologia più utilizzata è il LiDAR (Figura 1.1). Recentemente l'utilizzo di VSLAM (Virtual SLAM) permette di aggiungere dati da sistemi di visione 2D e 3D. Sia gli SLAM che i VSLAM sono computazionalmente altamente complessi e ci sono vari studi al riguardo. I VSLAM aggiungono un enorme volume di dati provenienti dal sistema di visione e richiedono sofisticati algoritmi per identificare i dati ridondanti ("rumore") e potenza di calcolo per identificare i diversi tipi di oggetti (o persone) che incontrano e rispondere in modo appropriato.



Figura 1.1: LiDAR (Sick)

1.3.3 Gestione flotta

Gli AMR sono solitamente connessi tra di loro attraverso un sistema di gestione flotta il quale coordina e monitora le loro attività. Questo sistema può essere configurato per gestire non solo i robot mobili ma anche altri macchinari o hardware, consentendo al robot di attivare operazioni come un nastro trasportatore

o una macchina utensile. I software di gestione flotta si stanno sviluppando velocemente mediante l'utilizzo di algoritmi avanzati per determinare il set-up ottimale della flotta e dei macchinari associati. La comunicazione tra robot e macchine può avvenire direttamente o attraverso il sistema di gestione centrale. Ad esempio, il comando di apertura di una porta può avvenire dal robot che manda un segnale al sistema di gestione che a sua volta manda il comando di apertura alla porta, oppure può essere direttamente il robot a dare il comando alla porta mentre al sistema centrale verrà notificata la nuova posizione del robot; è comune trovare sistemi ibridi tra i due.

1.3.4 Modelli computazionali in locale e remoto

La possibilità di connettere i robot in locale (*edge*) o in remoto (*cloud*) permette agli utilizzatori di raccogliere dati che possono essere analizzati per migliorarne le prestazioni. I dati provenienti da più robot che svolgono la stessa mansione possono essere aggregati e analizzati in modo da ottimizzare il programma, che successivamente può essere aggiornato in tutti i robot della flotta. Gli algoritmi per analizzare questo tipo di dati stanno diventando sempre più sofisticati e ciò permette correzioni rapide con aumenti di efficienza potenzialmente elevati.

La digitalizzazione dei macchinari nella produzione e nella logistica permette anche una migliore tracciabilità dei componenti di un prodotto.

1.3.5 Locomozione

La maggior parte degli AMR industriali è dotata di ruote (Figura 1.2a) e solo una minima parte è dotata di “gambe” (Figura 1.2b) per un utilizzo in ambienti interni dove sono presenti, oltre a superfici piane, scale, superfici inclinate o in ambienti esterni dove il terreno è irregolare; questi ultimi sono preferibili per un utilizzo da robot di ispezione. Gli AMR dotati di ruote sono tipicamente bidirezionali ma un certo numero è omnidirezionale. I robot omnidirezionali offrono una maggiore flessibilità di movimento ma con ruote più pesanti. È auspicabile che saranno svolti studi per ottenere ruote omnidirezionali più leggere e che richiedono meno energia per il funzionamento, in modo da spronarne l'utilizzo in futuro.

1.3.6 Materiali

I materiali di cui sono costituiti i robot influenzano la loro dimensione, peso e profili esterni, caratteristiche che ne influenzano l'idoneità a diversi ambienti di utilizzo inclusi quelli in cui è previsto, o possibile, un contatto con l'uomo; allo stesso modo anche i meccanismi e i materiali utilizzati per la locomozione devono essere adattati all'ambiente di utilizzo.

I produttori stanno usando materiali innovativi, leggeri e flessibili per la costruzione dei robot che devono entrare in contatto con l'uomo siano essi su



(a) OMRON “LD 60/90”



(b) ANYbotics “ANYmal C”

Figura 1.2: Tipologie di locomozione.

base fissa o mobile. Spesso viene utilizzato l'alluminio che offre leggerezza e rigidità ma c'è un progressivo orientamento verso materiali compositi con fibre di carbonio i quali consentono di ottenere maggiore leggerezza senza sacrificare la rigidità. Anche i motori stanno diventando più leggeri. In generale, avere robot più leggeri significa minori costi iniziali e un ammortamento più rapido potendo eseguire cicli più veloci.

I robot che possono entrare in contatto con l'uomo sono generalmente dotati di bordi arrotondati e in alcuni casi sono provvisti di "pelli protettive" (o *skin*). La *skin* può non solo assorbire le forze durante un contatto ma può essere equipaggiata di sensori che forniscono avanzate proprietà tattili necessarie anche per le pinze (*grippers*) fatte per manipolare materiali delicati. C'è un considerevole sviluppo nella "soft robotics" focalizzata sull'utilizzo di materiali flessibili per gli attuatori dei robot.

1.4 AMR nei luoghi di lavoro

1.4.1 Produzione

Gli AMR sono usati dai produttori per trasportare i pezzi attraverso la fabbrica come per asservire i macchinari. Gli AMR sono costituiti da una base mobile che può essere caricata con contenitori o equipaggiata di sistemi di manipolazione inclusi bracci robotici. Alcuni AMR sono costruiti per trainare altri contenitori dotati di ruote. Nella maggior parte dei casi, i movimenti della base mobile e del manipolatore avvengono in modo separato, la coordinazione simultanea dei movimenti risulta infatti complessa sia tecnicamente che per la sicurezza, ma ci si può aspettare di vedere applicazioni in cui vengono eseguiti contemporaneamente movimenti sia dalla base che dal manipolatore. Ad esempio, con un braccio robotico dotato di un sistema di visione 3D, potrebbe essere effettuata un'ispezione di qualità sugli oggetti trasportati dalla base mentre questa è in movimento.

Gli AMR sono inoltre più flessibili e sicuri dei carrelli elevatori, tuttavia la distinzione tra AMR e carrello elevatore inizia ad essere sfocata poiché esistono robot mobili dotati di forche che hanno la capacità di trasportare carichi con pesi tipici di quelli movimentati dai carrelli elevatori. Ad esempio, nell'automotive, si sta testando l'uso degli AMR per il trasporto dei telai delle auto tra le stazioni di produzione, con l'obiettivo di sostituire i nastri trasportatori, salvare spazio e aumentare la flessibilità nella riconfigurazione delle linee di produzione.

Gli AMR forniscono altri benefici oltre al semplice trasporto, possono infatti incrementare l'efficienza dell'intero processo produttivo. Ad esempio, il robot mobile può essere collegato al sistema gestionale come ai robot, o altri macchinari, nelle celle di produzione; il robot mobile che riceve la notifica di un nuovo ordine può a sua volta notificare al robot nella cella cui è destinato di attivarsi in automatico per la produzione di un nuovo lotto. Può inoltre essere equipaggiato

con un sistema di visione per verificare la conformità dei pezzi trasportati, in modo da scartare gli eventuali difettosi prima che raggiungano la stazione successiva. In questo modo si evita che i pezzi non conformi vengano ulteriormente lavorati e assemblati in un prodotto finito che, al momento dell'ispezione finale, verrebbe scartato.

In un modello di produzione modulare, operatori, robot e altri macchinari eseguono specifiche lavorazioni all'interno di celle produttive. Gli AMR prelevano tutte le parti necessarie a completare il lavoro della cella dal magazzino e poi trasportano il pezzo finito o il semilavorato alla cella successiva per ulteriori lavorazioni. I robot mobili sono istruiti attraverso il sistema di gestione flotta (a sua volta collegato al sistema gestionale) a quale cella sono destinati e possono notificare ai robot nella cella quale programma eseguire per la variante specifica di prodotto da ottenere. Questo aumenta la flessibilità produttiva e ottimizza i costi, riducendo lo spazio utilizzato solitamente per immagazzinare i semilavorati nell'area dedicata alla produzione finché non sono necessari alla linea produttiva. Anche le celle di produzione possono essere dedicate al singolo prodotto o possono essere flessibili: il robot nella cella può disporre di diversi utensili ed equipaggiare quello necessario in base alla notifica ricevuta dall'AMR o dal sistema gestionale.

In futuro, i robot mobili formeranno la spina dorsale delle soluzioni completamente robotiche per la produzione: invece di acquistare separatamente macchinario e robot, saranno a disposizione dei sistemi completi che comprendono una base mobile equipaggiata con un braccio robotico.

I robot mobili stanno avendo un incremento anche per l'ispezione dei pezzi durante la produzione. Sono inoltre utilizzati per controllare gli impianti produttivi in modo da garantirne la sicurezza ed individuare precocemente i macchinari che necessitano di manutenzione. Il mercato dei robot per ispezione ha avuto un incremento nelle vendite del 32% tra il 2018 e il 2019¹. La maggior parte dei robot per ispezione è dotata di ruote, ma è presente un certo numero di robot dotato di gambe per quegli impianti dove sono presenti delle scale.

1.4.2 Logistica

Il mercato degli AMR nella logistica sta avendo una rapida espansione, le vendite di robot logistici hanno avuto un incremento del 42% tra il 2018 e il 2019 coprendo il 43% del totale delle vendite di robot di servizio per uso professionale².

La maggior parte dei robot per la logistica è per un uso al chiuso. La progettazione di robot per l'uso all'aperto è complessa perché devono essere in grado di navigare stabilmente anche su superfici sconnesse e con condizioni climatiche variabili come pioggia o nebbia e improvvisi cambi di luce con possibili abbagliamenti. Tuttavia, gli sviluppi in altri settori outdoor, come agricoltura e difesa,

¹IFR World Robot Report 2020 - Service Robots

²Questi non includono i robot costruiti dalle aziende di logistica, come Amazon, per il loro uso interno.

potranno essere applicati in futuro anche per il settore della logistica. C'è anche un rapido sviluppo nel mercato nella logistica dell'“ultimo miglio” (la distanza tra l'ultimo punto di raccolta e la destinazione finale della consegna) per la quale i robot devono essere in grado di interagire in modo sicuro con gli altri veicoli e i pedoni ma allo stesso tempo riconoscere comportamenti malevoli nei loro confronti.

La maggior parte dei robot è equipaggiato con ruote e questo li limita ad un utilizzo dove non sono presenti degli scalini, ad esempio potrebbero non arrivare alla porta di una casa e perciò creare difficoltà al destinatario quando questo non ha la possibilità di prelevare il pacco dalla strada. Ciononostante, anche questo è un settore in crescita, spinto dall'utilizzo di robot per le consegne durante la pandemia di COVID-19.

Due motivazioni chiave per l'adozione degli AMR nella logistica sono la massimizzazione dello spazio a disposizione e la compensazione della carenza di mano d'opera. Si stima che il volume di prodotti processabile possa raddoppiare utilizzando i robot mobili nello stesso spazio di lavoro. Con il boom del settore, molte aziende si sono trovate ad affrontare carenze di personale durante i picchi produttivi, questi possono essere affrontati con l'utilizzo degli AMR che non solo sono efficaci in questi casi ma migliorano complessivamente la condizione di lavoro degli operatori i quali non devono più trasportare carichi pesanti e guidare i carrelli.

Tradizionalmente, i veicoli a guida autonoma (AGV) utilizzati nella logistica hanno lavorato in spazi altamente standardizzati, seguendo percorsi prestabiliti e trasportando pallet e casse di dimensioni uniformi. Le flotte di AGV stanno venendo integrate o sostituite dagli AMR. C'è un'elevata domanda per applicazioni quali il trasporto di pallet ed il carico e scarico di pallet; sono in uso sia basi mobili ma anche AMR dotati di forche per la movimentazione dei pallet e adatti al traino.

Un incremento nella domanda di piccoli lotti di prodotti personalizzati e con consegna rapida, sta cambiando la struttura degli impianti produttivi. Questo si ripercuote anche sulla logistica, tradizionalmente organizzata con nastri trasportatori fissi tra una stazione e l'altra, e sta portando all'utilizzo degli AMR per aumentarne la flessibilità. Anche gli strumenti tradizionali di trasporto come i nastri trasportatori e i carrelli elevatori si stanno evolvendo in versioni automatizzate.

Negli ultimi anni sono stati fatti grandi passi in avanti anche nei robot dedicati al pick-and-place che ora sono in grado di identificare rapidamente gli oggetti da prelevare, scegliere come prenderli e applicare il corretto movimento. In diversi casi questo viene eseguito mentre l'oggetto è in movimento, ad esempio su di un nastro trasportatore. La tecnologia a monte del processo di pick-and-place è molto complessa, utilizza la visione 3D, algoritmi di riconoscimento di immagini e algoritmi di pianificazione del moto per determinare la traiettoria di approccio, l'angolo e la forza di presa corretti. I robot per pick-and-place sono tipicamente

statici, ma in futuro potranno essere utilizzati a bordo di robot mobili.

1.5 Sicurezza e protezione

Esistono diverse norme per garantire la sicurezza degli operatori umani attorno ai robot mobili. In Tabella 1.2 viene data una panoramica delle norme applicabili dai produttori.

Norma	Applicazione	Dettaglio
ANSI/RIA R15.08-1-2020	Robot mobili industriali	Norma attualmente disponibile in USA per robot mobili operanti in ambiente industriale (non in contatto con un pubblico generico). Tipi coperti: • Tipo A: AMR (solamente piattaforma). • Tipo B: IMR di tipo A con un “allegato” che non è un manipolatore. L’“allegato” può essere passivo o attivo. • Tipo C: un “manipolatore mobile” (dove per manipolatore si intende un robot industriale nel caso fosse stato fisso) montato su una piattaforma mobile che può essere un IMR tipo A o un AGV.
ISO 13482	Robot per la cura personale (“robot di servizio”)	Copre: • robot di servizio; • robot per assistenza fisica; • robot per trasporto persone.
ISO/TS 15066	Requisiti di sicurezza per sistemi robotici collaborativi industriali e lo spazio di lavoro	Si rimanda al Paragrafo 2.4 per ulteriori approfondimenti.
ISO 3691-4	Camion senza conducente e loro sistemi	Ricopre gli AMR utilizzati in ambito industriale, tuttavia vengono date linee guida più precise in ANSI/RIA R15.08.

Tabella 1.2: Norme di sicurezza applicabili ai robot mobili.

Capitolo 2

Robotica collaborativa

2.1 Collaborazione uomo-robot

La collaborazione uomo-robot può contribuire allo sviluppo dell'industria del futuro, uno spazio in cui umani e robot possono lavorare e svolgere compiti assieme. Questo permette agli operatori umani di focalizzarsi su attività a valore aggiunto¹ o che richiedono alti livelli di destrezza, così da liberarli da attività ripetitive o potenzialmente rischiose. Tuttavia, alcune attività possono essere troppo complesse per essere eseguite dai robot o troppo costose per essere automatizzate, come potrebbero richiedere sistemi e attrezzature progettate appositamente. Perciò, un ambiente collaborativo in cui uomo e robot possono lavorare fianco a fianco e condividere attività in uno spazio aperto e privo di barriere è un obiettivo rilevante da raggiungere. In questo ambito è quindi richiesto l'utilizzo di una tipologia particolare di robot, i cobot:

Definizione 1 *Un “cobot” o “co-robot” (derivante da “collaborative robot”) è un robot concepito per interagire fisicamente con l'uomo in uno spazio di lavoro.*

Dove per spazio di lavoro si intende l'insieme dei punti nello spazio raggiungibili dal robot.

La sicurezza e l'interazione sono le chiavi per il successo della collaborazione uomo-robot. La sicurezza dell'operatore deve essere sempre garantita durante lo svolgimento delle operazioni e siccome dei ripari fisici sarebbero impraticabili per una cooperazione reale, è possibile utilizzare una limitazione di potenza, forza o velocità e un monitoraggio della separazione tra uomo e robot, in accordo con quanto stabilito dalle norme ISO (International Organization for Standardization). Per quanto riguarda l'interazione, il robot deve essere costantemente a conoscenza di ciò che gli avviene attorno e monitorare le azioni dell'operatore in modo da modificare il proprio comportamento (velocità e/o traiettoria)

¹Vengono definite attività a valore aggiunto quei processi che aggiungono al prodotto, o servizio, un valore riconosciuto dal cliente e per cui questo è disposto a pagare.

mantenendo la distanza di sicurezza. Una comunicazione bidirezionale tra uomo e robot, contribuisce ad ottenere una collaborazione più efficiente e sicura. I differenti approcci per un'interazione sicura tra uomo e robot possono essere classificati come strategie pre-collisione e post-collisione:

- Le strategie pre-collisione sono molto rilevanti non solo per il prevenire le collisioni, individuandole in anticipo, ma anche perché ci sono più di 1.5 milioni di robot industriali già in uso nel mondo e c'è molto interesse nel progettare soluzioni che possano renderli sicuri per l'uomo. Ci sono molti approcci per dotare le celle robotiche di sensori per determinare se una persona è nelle vicinanze del robot e sono state sviluppate delle soluzioni add-on da applicare su robot che non sono intrinsecamente sviluppati per essere sicuri per l'uomo.
- Le strategie post-collisione rilevano la collisione quando questa avviene e cercano di limitarne i danni risultanti. La maggior parte dei robot commerciali volutamente progettati per applicazioni collaborative ricade in questa categoria. I metodi implementativi possono essere diversi, il più comune è la limitazione della potenza e della forza utilizzando una serie di attuatori elastici, che minimizzano la forza di impatto, e l'utilizzo di "pelli protettive" (o *skin*) che rilevano la collisione o la prossimità dell'operatore. Tra questi robot commerciali ricade anche il KUKA LBR iiwa.

2.2 Modalità di interazione

La comunicazione tra un robot ed un essere umano può avvenire sia per mezzo dei dispositivi "classici" dell'interazione uomo-computer (tastiera, mouse, touchpad, monitor, touchscreen, ecc.) oppure utilizzando modalità interattive più "naturali", tipiche dell'interazione uomo-uomo, in grado di coinvolgere tutti i sensi umani e i canali di comunicazione, come il parlato, la visione, la gestualità e il tatto.

In generale, è possibile distinguere sei categorie principali di modalità di interazione "naturali", anche se in alcuni casi i confini tra le diverse modalità appaiono sfumati:

1. parlato: interazione per mezzo della voce, sia per dare istruzioni che per ricevere risposte;
2. gesti: riconoscimento e produzione di gesti;
3. espressioni facciali: interpretazione e produzione di espressioni facciali;
4. tracciamento dello sguardo: identificazione della direzione dello sguardo dell'uomo;

5. prossemica e cinesica: la prossemica concerne la distanza tra gli interlocutori e la sua variazione. La cinesica riguarda il movimento e l'assunzione di posizioni da parte del corpo umano;
6. aptica: studio dell'acquisizione dell'informazione e della manipolazione attraverso il tatto.

2.3 Interazione fisica

Durante l'interazione fisica tra uomo e robot (physical Human-Robot Interaction, pHRI) il robot misura i movimenti o le forze generati dall'umano e ne risponde in modo adeguato. Esistono diversi metodi per controllare i robot in contatto con un ambiente meccanico, essi sono denominati: controllo di forza (in)diretto (Maples and Becker, 1986), controllo di impedenza (Hogan, 1985), controllo di ammettenza (Newman, 1992; Whitney, 1977) e controllo completo dell'interazione (Albu-Schäffer et al., 2004, 2007). L'operatore viene solitamente considerato come un caso particolare di *ambiente*.

Per il *controllo di ammettenza* si trovano in letteratura diversi nomi, in ogni caso però, viene effettuata una misura di forza che genera un riferimento per il controllo del movimento o una deviazione da un valore di riferimento a cui mantenere il robot.

Durante l'interazione fisica dell'uomo con il robot, il controllore del robot deve raggiungere il livello di performance voluto garantendo al contempo la stabilità del sistema. La stabilità del sistema uomo-robot dipende dalla dinamica che si instaura dall'accoppiamento dei singoli sistemi e può alterare le performance di entrambi.

Un'altra proprietà importante per il controllo del robot durante l'interazione è la *trasparenza*. La trasparenza si riferisce alla capacità del controllore di compensare le imperfezioni hardware come inerzia, attriti, backlash e vibrazioni in modo tale che il carico e il meccanismo risultino "nascosti" mentre il modello applicato (impedenza o ammettenza) viene percepito dall'utilizzatore. Ad esempio, in alcune applicazioni il robot non deve opporre resistenza alla forza applicata dall'operatore umano mentre lo guida e muoversi in modo da seguire i movimenti che desidera compiere. Questo problema è particolarmente critico durante la manipolazione collaborativa, dove un oggetto viene afferrato contemporaneamente dall'operatore e dal robot. Prestazioni simili possono essere richieste anche per applicazioni mediche o in ambito industriale, come nell'assemblaggio assistito. La trasparenza viene ottenuta solitamente con un feedback in forza, tuttavia anche la trasparenza richiede la stabilità: è necessaria un'elevata banda passante con un alto guadagno per il feedback in forza per ottenere una buona trasparenza, ma è stato dimostrato che questa condizione può portare ad instabilità se l'ambiente è rigido o generalmente se l'impedenza dell'ambiente è sconosciuta o variabile.

La stabilità nell'interazione è legata anche al controllo dell'impedenza meccanica. Nei robot tradizionali, mossi da attuatori rigidi, l'impedenza è ottenuta tramite un *controllo attivo di forza*, mentre i più recenti robot equipaggiati con sensori di coppia ai giunti e controllati con anelli veloci a basso livello (ad esempio il KUKA LBR iiwa) possono raggiungere un buon livello di impedenza in modo sicuro.

2.3.1 Controllo di ammettenza

Nel controllo di ammettenza, misurata la forza di interazione tra uomo e robot, il riferimento del sistema di controllo viene modificato attraverso il modello dinamico virtuale in modo da ottenere in risposta il comportamento desiderato. In Figura 2.1 è rappresentato lo schema a blocchi semplificato di un controllo di ammettenza disaccoppiato (si trascura la dinamica introdotta dal contatto con l'operatore), si vede la forza esterna applicata F_{ext} che attraversa la dinamica virtuale Y_v per generare il riferimento di velocità v_d . Il controllore C cerca di imporre questa velocità al robot Y_r applicando una forza di controllo F_C mediante un attuttore (non mostrato). La forza esterna F_{ext} agisce anche direttamente sulla dinamica del robot Y_r , ne risulta un movimento dato da v . Dato che il controllo di molti dispositivi controllati in ammettenza è di posizione

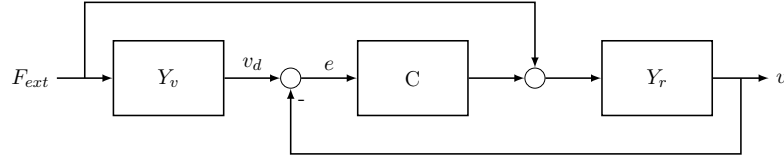


Figura 2.1: Schema semplificato del controllo di ammettenza disaccoppiato.

o velocità, è semplice andare a creare dei vincoli tattili rigidi o dissipativi per assistere l'operatore nelle operazioni cooperative. Se non è necessario imporre dei vincoli all'umano, il robot dovrebbe presentare un'alta ammettenza (quindi una bassa impedenza) e preferibilmente si vorrebbe che l'ammettenza apparente sia più elevata di quella naturale del robot inerte, pesante e dissipativo. Ottenere un'ammettenza infinita, o impedenza nulla, su tutta la banda di frequenze operative non è possibile mediante un controllo di ammettenza, questo è dovuto alla divisione per zero che si verrebbe a verificare nella relazione tra forza e velocità. Un approccio comune è quello di avere una dinamica virtuale con *pura inerzia virtuale* e "più bassa possibile" mantenendo la stabilità del sistema quando è accoppiato con l'utilizzatore. La pura inerzia virtuale garantisce bassa impedenza per basse frequenze, attenuazione delle alte frequenze e comportamento non dissipativo. L'approccio con bassa inerzia virtuale cerca di minimizzare la forza di interazione tra dispositivo e utilizzatore. Un problema di questo metodo è che abbassando l'inerzia virtuale, il robot diventa instabile quando è a contat-

to con un arto o un ambiente rigidi. Ridurre l'inerzia apparente mantenendo un'interazione stabile e sicura è perciò una sfida per il controllo di ammettenza.

Ammettenza vs Impedenza

La maggior parte dei controlli utilizzati nelle applicazioni di aptica e pHRI ricadono nel controllo di impedenza con feedback di forza e nel controllo di ammettenza con feedback di posizione o velocità. Ciononostante, il controllo di impedenza risulta più utilizzato del controllo di ammettenza perché porta ad un minor costo della componentistica necessaria. La principale differenza tra controllo di ammettenza e controllo di impedenza è che il primo controlla il movimento dopo che è stata misurata una forza mentre il secondo controlla la forza dopo la misurazione di un movimento o una deviazione dal riferimento.

I dispositivi con controllo di impedenza sono comunemente utilizzati per l'aptica manuale e i display per teleoperazione. Il controllo di ammettenza è utilizzato più spesso per dispositivi con alti attriti del tipo full-body (ad esempio esoscheletri) o di tipo robusto (industriali). Questa differenza è dovuta principalmente alla facilità di progettazione di dispositivi con controllo di impedenza di prestazioni adeguate e con una generazione di forza ad anello aperto. Questo elude la necessità di utilizzare sensori di forza, che sono generalmente costosi e sensibili a deriva e variazioni di temperatura, e non richiede una meccanica rigida del robot che sarebbe preferibile per un sistema con controllo di forza ad anello chiuso. Uno svantaggio di questo metodo è la percezione disturbante della dinamica parassita rimanente e degli effetti dell'attrito del dispositivo stesso. Di conseguenza questi dispositivi ad impedenza sono comunemente progettati per essere leggeri e con bassi attriti. Se la generazione della forza da parte del controllo di impedenza è ad anello aperto, il dispositivo risulta molto sensibile al backlash e alla flessibilità del robot. Se un controllo di forza viene usato esplicitamente nel controllo di impedenza, la dinamica parassita del sistema viene soppressa. Il controllo di forza in catena chiusa nel controllo di impedenza e il controllo in catena chiusa del movimento nel controllo di ammettenza, permettono una migliore approssimazione alla dinamica virtuale. La possibilità che non siano presenti dei sensori di forza, limita la larghezza di banda del controllo di forza con controllo di impedenza. Questo è un problema meno rilevante nel controllo di ammettenza perché i sensori di velocità sono solitamente presenti, sebbene questa flessibilità interna comporti una meno robusta stabilità quando il sistema è accoppiato e riduca l'approssimazione della dinamica virtuale. Il range di *dinamica apparente* o *z-width* risulta più elevato per il controllo di ammettenza che per il controllo di impedenza.

Stabilità e passività

Un sistema progettato per una interazione fisica, punta a raggiungere diversi tipi di stabilità:

1. Stabilità disaccoppiata: quando il dispositivo è “libero”, senza contatto con l’uomo;
2. Stabilità in transizione: quando avviene la transizione tra sistema libero e accoppiato;
3. Stabilità accoppiata: quando il dispositivo è e rimane in contatto con l’operatore o l’ambiente.

Nella pratica, un robot controllato tramite controllo di ammettenza potrà avere un contatto o essere già a contatto con un umano, un oggetto o l’ambiente. La possibilità di entrare e interrompere il contatto è detta *transizione*, che potrebbe portare ad una *instabilità di commutazione*.

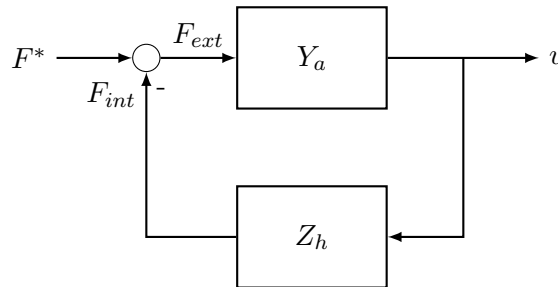


Figura 2.2: Interconnessione robot-uomo.

Stabilità accoppiata Un umano e una macchina in contatto tra loro, che si scambiano potenza meccanica o esercitano forze bilateralmente, si comportano come un singolo sistema accoppiato come si vede in Figura 2.2: l’interconnessione tra il robot, che presenta un’ammettenza apparente Y_a , e l’umano, che ha impedenza Z_h , crea un anello chiuso. La forza esterna volontariamente esercitata dall’operatore è data da F^* , la forza generata dalla dinamica intrinseca della persona è data da F_{int} ed entrambe si sommano alla totale forza esterna F_{ext} percepita dal robot. Questa forza attraversa la dinamica del sistema Y_a e genera la velocità v .

La stabilità accoppiata non è banale dato che due sistemi stabili quando separati, potrebbero diventare instabili quando diventano accoppiati, oppure un sistema robotico instabile potrebbe diventare stabile quando è in contatto con l’utente. L’interazione tra un dispositivo controllato in ammettenza e l’utilizzatore umano crea un “anello di forza” con feedback negativo, perciò la stabilità del sistema è fortemente influenzata dalle caratteristiche di impedenza dell’utente.

Stabilità accoppiata robusta: passività energetica Dall’esperienza di tutti i giorni si sa per certo che l’interazione tra uomo e oggetti energeticamente

passivi è stabile. Questo concetto si può estendere all'interazione tra uomo e robot: finché la dinamica apparente del robot controllato risulta energeticamente passiva, il sistema uomo-robot si mantiene stabile.

Il comportamento energeticamente passivo della dinamica apparente del robot controllato, insieme ad una buona prestazione, formano l'obiettivo della progettazione del sistema, poiché hanno la responsabilità della stabilità nell'interazione con l'uomo.

Definizione 2 *Un sistema energeticamente passivo non può emettere più energia di quanta ne sia stata immessa.*

Per un sistema meccanico, questo richiede che:

$$\int_{-\infty}^t F(\tau)v(\tau) d\tau \geq 0 \quad (2.1)$$

dove F e v sono rispettivamente la forza e la velocità che generano potenza in ingresso o in uscita dal sistema meccanico, questo vale per la causalità sia per l'ammettenza che per l'impedenza. Se il comportamento dinamico apparente del robot durante i movimenti liberi è progettato per agire come un sistema passivo in accordo con l'Equazione (2.1), la stabilità è garantita per ogni combinazione di accoppiamento del robot passivo con qualsiasi altro sistema passivo.

Nella pratica, diversi autori suggeriscono che imporre la passività sia troppo conservativo per le interazioni uomo-macchina, questo è dovuto principalmente al fatto che l'impedenza umana durante l'interazione è limitata, perciò mirare alla stabilità accoppiata con qualsiasi arto umano, che può essere infinitamente rigido, avere una massa inerziale infinita o infinitamente dissipativo, è conservativo.

2.4 Standard di sicurezza

I requisiti di sicurezza per i robot e i dispositivi robotici sono stabiliti dalle norme:

- *ISO 10218-1:2011-Parte 1: Robot*: sono specificati i requisiti e le linee guida per una progettazione sicura, le misure di protezione e le informazioni per l'uso di robot industriali. Vengono descritti anche i pericoli di base associati ai robot e fornisce i requisiti per eliminare, o ridurre adeguatamente, i rischi associati a tali pericoli. Il robot non viene considerato come una macchina completa e perciò l'emissione acustica non viene considerata come un pericolo significativo del robot in sé, di conseguenza il rumore è escluso dall'ambito di applicazione della norma. Inoltre non viene applicata per robot non industriali, sebbene i principi di sicurezza stabiliti al suo interno possano essere seguiti per tali robot.

- *ISO 10218-2:2011-Parte 2: Sistemi robotici ed integrazione*: sono specificati i requisiti per l'integrazione di robot industriali, di sistemi robotici industriali come definiti nella ISO 10218-1:2011 e di celle robotiche industriali. L'*integrazione* include:
 - la progettazione, produzione, installazione, funzionamento, manutenzione e dismissione del sistema robotico industriale o cella;
 - le informazioni necessarie per la progettazione, produzione, installazione, funzionamento, manutenzione e dismissione del sistema robotico industriale o cella;
 - dispositivi e componenti del sistema robotico industriale o cella.

Vengono descritti i pericoli base e le situazioni pericolose identificabili in questi sistemi e fornisce i requisiti per eliminare, o ridurre adeguatamente, i rischi associati a tali pericoli. Sono specificati i requisiti per il sistema robotico industriale come parte di un sistema di produzione integrato. Non vengono trattati in modo specifico i pericoli derivanti dal processo produttivo, ai quali vengono applicate altre norme.

Nel caso dei cobot, è stata definita la *specifica tecnica*² ISO/TS 15066:2016. In essa vengono specificati i requisiti di sicurezza per i sistemi robotici collaborativi industriali e l'ambiente di lavoro, inoltre integra i requisiti e le linee guida rispetto alle operazioni sui cobot industriali date dalle ISO 10218-1 e ISO 10218-2. Questo documento si sviluppa dalla considerazione: se un'applicazione eseguita dal robot non può creare dolore o ferite all'uomo, perché non consentire il contatto con quest'ultimo? Di conseguenza, l'idea cardine con cui vengono definite, all'interno della specifica, *quattro* tecniche di operazioni collaborative, è: *se può avvenire un contatto accidentale tra umano e macchina, questo non deve causare dolore o ferite*.

In particolare vengono specificate:

- Definizioni;
- Caratteristiche importanti dei sistemi di controllo di sicurezza;
- Fattori da considerare nella progettazione dei sistemi robotici collaborativi;
- Sistemi integrati di sicurezza e loro uso effettivo;
- Linee guida per implementare le seguenti tecniche collaborative:

²Una specifica tecnica (identificata con TS: Technical Specification) si distingue da una norma in quanto viene utilizzata per definire l'attuale "stato dell'arte" e consentire alla comunità di poterci lavorare ben sapendo che potrà subire cambiamenti e integrazioni future. Contiene quindi le informazioni che sono destinate, in ultima analisi, ad apparire in una norma.

- arresto monitorato di sicurezza: un cobot normalmente opera su di un pezzo da lavorare in uno spazio di lavoro ben definito. Se un operatore entra nello spazio di lavoro, il cobot si arresta completamente in modo da consentire all'operatore di intervenire sul pezzo in lavorazione;
- guida manuale: il cobot è cedevole (compliant) e viene mosso manualmente dall'utente, questo permette di insegnare al robot delle traiettorie in modo semplice ed intuitivo, rendendo possibili anche complesse interazioni collaborative;
- velocità e monitoraggio della separazione: lo spazio di lavoro del cobot è diviso in zone, maggiore è la vicinanza dell'operatore al robot e più questo rallenta i suoi movimenti, fino ad arrestarsi al di sotto di una certa soglia. In questo modo viene mantenuta una distanza minima tra uomo e robot evitandone il contatto e migliorando la sicurezza. Sono specificate le velocità massime consentite e le distanze minime ammesse;
- limitazioni di potenza e forza: il cobot è programmato in modo da operare solamente con livelli tollerabili di forza e coppia. Sono inclusi dati provenienti da studi sulle differenti soglie di dolore delle diverse parti del corpo umano.

Viene presa in considerazione anche l'eventualità che l'operatore possa scontrarsi con un robot fermo, quindi è richiesto che siano minimizzati bordi taglienti e sporgenze per l'intero sistema e l'attrezzatura associata, in modo da ridurre al minimo la possibilità di danni alla persona.

Capitolo 3

KMR iiwa 14 R820 omniMove

3.1 Panoramica



Figura 3.1

In Figura 3.1 è rappresentato il robot denominato KMR, composto dal manipolatore LBR iiwa 14 R820 (1) e dalla base mobile KMP 200 omniMove (2).

Mediante il braccio robotico, il KMR può sollevare e appoggiare autonomamente gli oggetti trasportati mentre, quando il veicolo si muove, il robot è in “posizione di spostamento”. Il KMR è utile per il trasporto di componenti ed apparecchi fino al luogo di impiego ed è pensato per il funzionamento autonomo, con l’aiuto del software “KUKA Navigation Solution”, oppure può essere comandato manualmente con lo “smartPAD” o con il radiocomando (opzionale). Il veicolo può essere spostato in ogni direzione e posizionato in modo preciso grazie al telaio omniMove dotato di ruote omnidirezionali; è pensato per il funzionamento su fondi piani, solidi e con inclinazione non superiore a quella ammessa ed è dotato di scanner laser per il monitoraggio dell’ambiente circostante durante la movimentazione. L’alimentazione è garantita da una batteria di trazione integrata nel veicolo che permette di alimentare l’insieme di base mobile e manipolatore. Il KMR dispone delle seguenti caratteristiche:

- movimento automatico del veicolo e del robot senza alimentazione di energia esterna;
- il manipolatore LBR iiwa si muove solo a veicolo fermo. Prima dei movimenti del veicolo, il robot si muove in “posizione di spostamento”;
- capacità della batteria per funzionamento di marcia e funzionamento robot fino a 8 ore senza ricaricare;
- portata del veicolo: 170 kg;
- portata del robot: 14 kg;
- monitoraggio dell’ambiente circostante con scanner laser.

Si rimanda alla Tabella 3.1 per maggiori dettagli.

3.2 KMP 200 omniMove

3.2.1 Direzioni di marcia della piattaforma

L’utilizzo delle particolari ruote Mecanum (Paragrafo 3.2.2) permette alla base mobile di compiere movimenti omnidirezionali e la rotazione attorno al proprio asse verticale, in Tabella 3.2 viene data una panoramica degli spostamenti eseguibili con i relativi movimenti delle ruote.

Durante la marcia, viene fornito un feedback visivo del verso di spostamento del robot mediante delle strisce led RGB incorporate nel telaio.

3.2.2 Ruota Mecanum

La ruota Mecanum (Figura 3.2) è composta da rotelle Vulkollan[®] prive di azionamento, di forma particolare, montate sul cerchione. Le rotelle hanno una

Lunghezza del veicolo	1080 mm
Lunghezza max. del KMR con spazio di lavoro del robot	1773 mm
Altezza del veicolo (KMP)	700 mm
Altezza max. del KMR con spazio di lavoro del robot	1880 mm
Larghezza del veicolo	630 mm
Larghezza max. del KMR con spazio di lavoro del robot	1319 mm
Peso del veicolo	397 kg
Peso KMR	427 kg
Carico massimo	168 kg
Velocità di movimento longitudinale standard	1 m/s
Velocità di movimento trasversale standard	0,56 m/s
Velocità di movimento diagonale standard	0,56 m/s
Velocità di rotazione standard	0,51 rad/s
Accelerazione massima	0,5 m/s ²
Ritardo di frenatura massimo	1 m/s ²
Ritardo di frenatura con arresto di sicurezza 0	3 m/s ²

Tabella 3.1: Caratteristiche generali KMR.

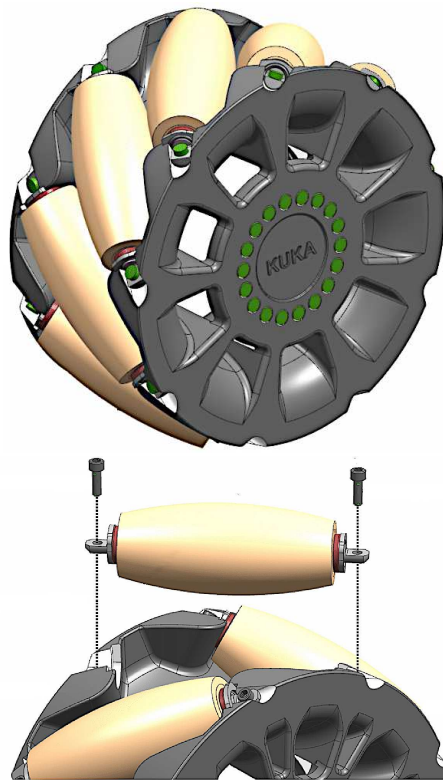


Figura 3.2: Ruota Mecanum e dettaglio rotella.

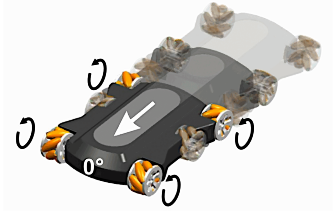
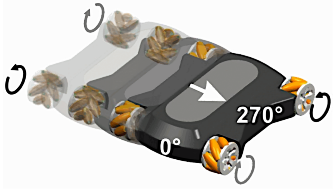
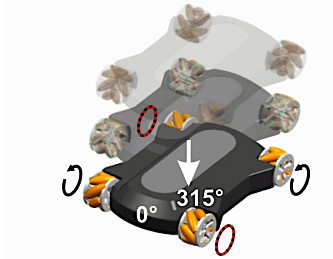
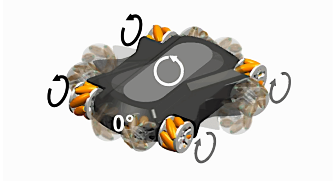
Direzione di marcia	Senso di rotazione ruote
Corsa dritta	Tutte le ruote si muovono alla stessa velocità in una direzione
	
Corsa laterale	Ogni ruota si muove in senso contrario rispetto a quella adiacente. Tutte le ruote si muovono alla stessa velocità.
	
Corsa diagonale	Una coppia di ruote disposta diagonalmente si muove nello stesso senso di rotazione alla stessa velocità. La coppia di ruote diagonale incrociata è ferma.
	
Rotazione attorno all'asse centrale	Le ruote di un lato ruotano in senso contrario alle ruote dell'altro lato. Tutte le ruote girano alla stessa velocità.
	
Curva Quando si percorrono delle curve i due movimenti si sovrappongono, ad esempio: corsa dritta e rotazione attorno all'asse centrale.	Rotazioni date dalla combinazione dei movimenti.

Tabella 3.2: Spostamenti base mobile.

forma e una disposizione sul perimetro della ruota tali da assumere una forma circolare. Le ruote non hanno alcun meccanismo di sterzo, perciò la modifica della direzione del veicolo viene definita dal senso di rotazione e dalla velocità delle ruote, ognuna delle quali dispone di una propria unità di trazione composta da un motore elettrico ed un ingranaggio.

La ruota Mecanum è priva di usura per i seguenti motivi:

- il cerchione, esterno e sporgente, protegge i danni dai raccordi dei cuscinetti a rulli;
- il nucleo del corpo portante è adattato alla forma delle ruote;
- i componenti difettosi possono essere sostituiti singolarmente.

3.3 LBR iiwa 14 R820

Il robot LBR iiwa è classificato come robot leggero ed è un robot a braccio articolato con 7 assi. Tutte le unità di motorizzazione e i cavi elettrici sono protetti all'interno del robot. Ogni giunto è equipaggiato con un sensore di posizione in input, un sensore di coppia in output e sensori di temperatura che ne prevengono il surriscaldamento.. Il robot può operare con controllo di posizione e controllo di impedenza.

Il robot (Figura 3.3) è composto principalmente da:

1. polso in linea: il robot è dotato di un polso in linea a 2 assi. I motori sono localizzati negli assi A6 e A7;
2. modulo giunto: l'unità di movimento è situata all'interno della struttura in alluminio, i moduli sono collegati tra loro attraverso la struttura stessa;
3. base frame: è la base del robot. L'interfaccia A1 è posta sul retro del base frame, essa costituisce l'interfaccia per i cavi di collegamento del robot, del controllore e del sistema di alimentazione.

3.3.1 Rilevazione forze

Il manipolatore LBR è dotato di sensori di posizione e coppia ai giunti per ogni asse, questo permette di misurare e reagire a forze e coppie esterne. Nel caso in esame si trova utile la misurazione delle forze alla flangia riferite al TCP (Tool Center Point). La forza applicata al TCP non viene misurata direttamente ma viene calcolata usando il modello dinamico del robot, l'accuratezza del calcolo della forza esterna applicata dipende dalla dinamica del movimento del robot, dall'entità della forza applicata e da altri fattori:

- la posa del robot: il controllo riconosce le pose non ammissibili e restituisce un errore. Le pose non ammissibili sono quelle in cui è possibile che le forze

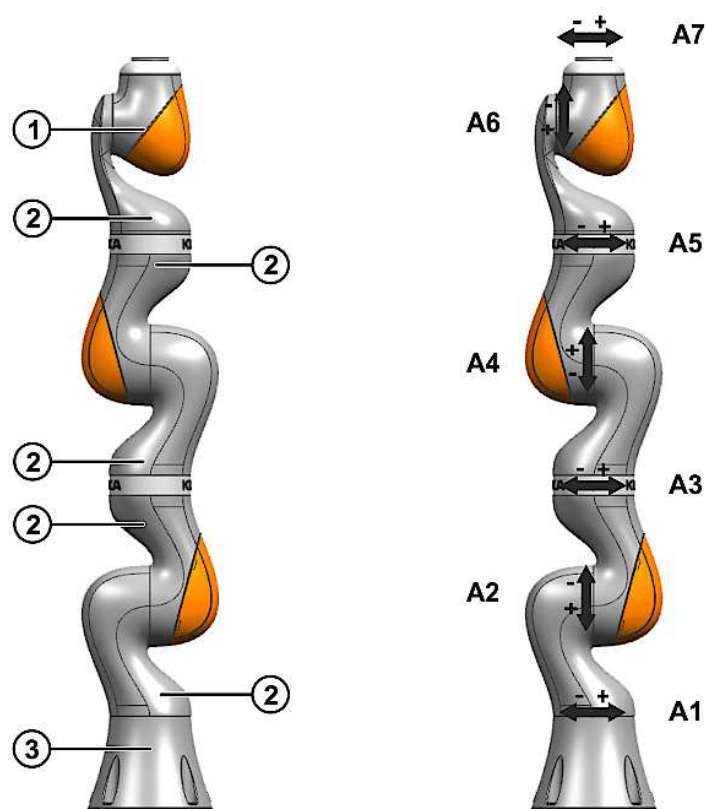


Figura 3.3: Parti del robot e indicazione assi.

applicate al TCP abbiano una distanza “troppo piccola” rispetto a tutti gli assi del robot, è il caso delle pose che generano singolarità e quelle che sono in un intorno della singolarità;

- le forze esterne applicate al robot: in molti casi il controllo rileva automaticamente le forze esterne che portano ad una violazione del monitoraggio delle forze sul TCP.

Rilevazione delle forze al TCP in direzioni specifiche

La forza esterna, applicata secondo uno specifico asse sul tool del robot o sulla flangia, può essere monitorata relativamente ad un sistema di coordinate di base all'interno dei valori limite ammissibili. Come impostazione standard viene utilizzato il sistema di riferimento denominato “World” situato alla base del manipolatore. In Figura 3.4 viene illustrato un esempio di applicazione della forza in relazione al sistema di riferimento World. Il vettore rappresentativo della forza applicata viene scomposto nelle tre componenti relative ai tre assi di riferimento.

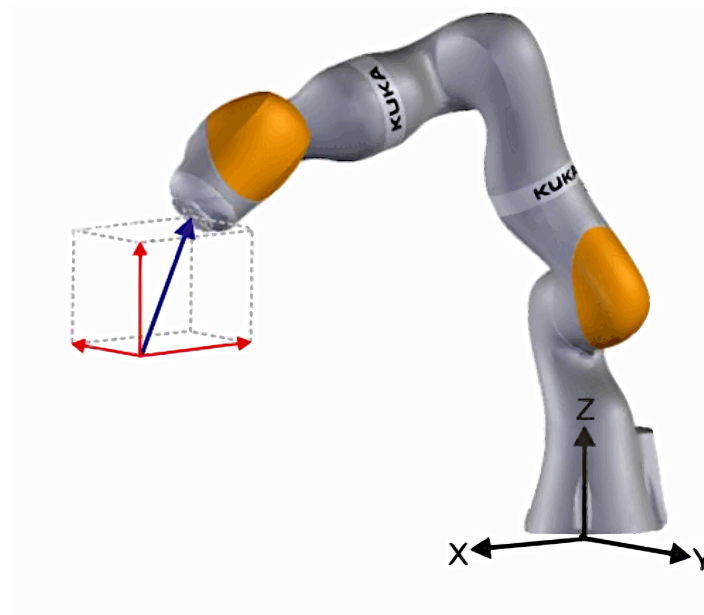


Figura 3.4: Esempio di rilevazione forza al TCP.

3.4 KUKA Sunrise.OS

Il KUKA Sunrise.OS è un pacchetto di software di sistema per robot industriali nel quale la programmazione e le operazioni di controllo dell'operatore sono rigorosamente separate l'una dall'altra. Le applicazioni del robot sono programmate

con il software KUKA Sunrise.Workbench.

Una cella robotica, o stazione, è costituita da un controllore del robot, un manipolatore e altri dispositivi ed è azionata tramite il pannello di controllo KUKA SmartPAD. Una stazione può eseguire diverse operazioni (task). In Figura 3.5

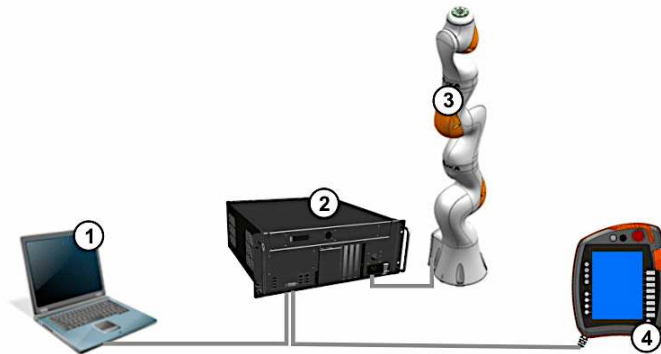


Figura 3.5: Separazione tra controllo operazioni e programmazione.

si possono individuare:

1. computer di sviluppo con software KUKA Sunrise.Workbench;
2. controllore del robot KUKA Sunrise Cabinet;
3. manipolatore;
4. KUKA smartPAD.

È da notare che per l'applicazione da svolgere, essendo il manipolatore installato sulla piattaforma mobile, la connessione tra computer e sistema robotico avviene tramite Wi-Fi e il controllore del robot, incluso nella base mobile, può gestire l'intero KMR.

Capitolo 4

Definizione applicazione



Figura 4.1: Posizione manipolatore per il movimento collaborativo.

L'applicazione sviluppata si pone l'obiettivo di consentire all'operatore di muovere il KMR mediante un'interazione fisica tramite la quale, trasmettendo delle forze/deviazioni dalla posizione di partenza alla flangia del manipolatore LBR (Figura 4.1 e Figura 4.2), si ottiene il movimento desiderato. Questo tipo di approccio per la guida manuale permette all'utente di interagire direttamente e in modo intuitivo con il robot mobile, limitando l'uso dello smartPAD alla sola attivazione dell'applicazione, inoltre non richiede la conoscenza del sistema di riferimento della base mobile per gli spostamenti poiché questi sono progettati per essere congruenti con i versi dell'interazione.



Figura 4.2: Posizione durante la guida manuale.

Le tipologie di spostamento ottenibili sono:

- spostamento longitudinale lungo l'asse x_b ;
- spostamento trasversale lungo l'asse y_b ;
- rotazione attorno all'asse z_b ;
- una combinazione dei precedenti.

Le manipolazioni che l'operatore deve effettuare per ottenere i movimenti desiderati sono riassunte in Tabella 4.1, si considera come sistema di riferimento quello dato in Figura 4.3 denominato ReferenceFrame, ottenuto dal frame World¹ del manipolatore (pedice “w”) mediante una rotazione di $\pi/2$ rad attorno all'asse z (Figura 4.4). Questa rotazione consente di avere una uguale orientazione tra il sistema di riferimento del manipolatore (pedice “m”) e quello della base mobile (pedice “b”) e facilita così la definizione dei versi dei comandi di spostamento.

Interazione	Movimento generato
Forza/Deviazione in x_m	Spostamento lungo l'asse x_b
Forza/Deviazione in y_m	Spostamento lungo l'asse y_b
Coppia/Deviazione al giunto A7	Rotazione attorno all'asse z_b

Tabella 4.1: Movimenti manuali.

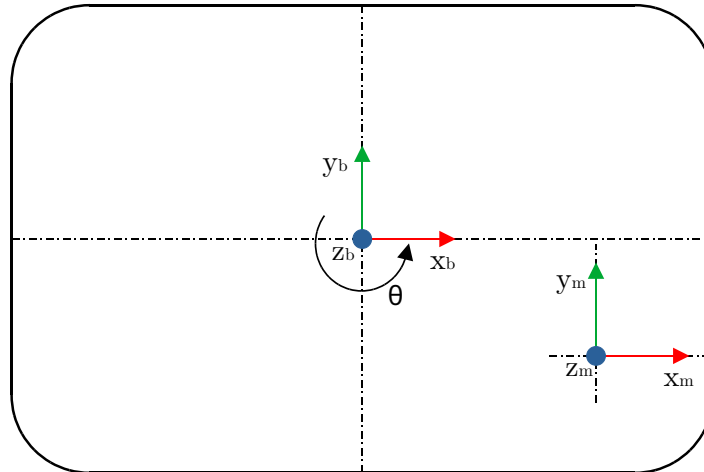


Figura 4.3: Sistemi di riferimento adottati.

Le strategie di controllo sviluppate per il movimento collaborativo sono:

¹Il frame World del manipolatore è definito di default e non può essere modificato ma si possono derivare dei frame definiti “child” mediante operazioni di traslazione e/o rotazione rispetto ad esso.

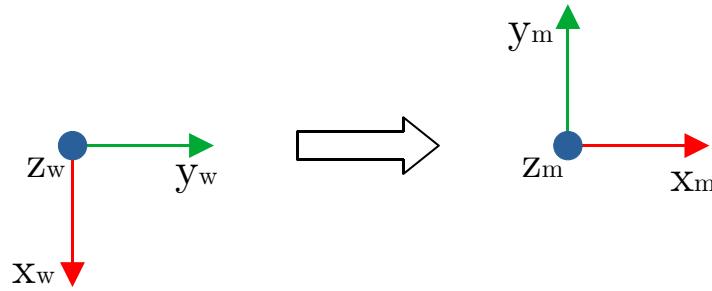


Figura 4.4: Trasformazione da sistema di riferimento World a ReferenceFrame.

- controllo di ammettenza con modello proporzionale;
- controllo di ammettenza con modello di oscillatore semplice smorzato;
- controllo di posizione proporzionale allo spostamento della flangia.

Le prime due sono pensate per lo spostamento macroscopico della base mobile mentre l'ultima è adatta ad un posizionamento preciso. Verranno discusse in dettaglio nel Capitolo 5.

L'utilizzo del controllo di impedenza sul manipolatore (impostato utilizzando le istruzioni già disponibili per il controllo dell'LBR) consente una manipolazione più ergonomica del sistema e la possibilità di modificare la rigidità del manipolatore durante i movimenti in modo da fornire un feedback in forza all'operatore nel caso di violazione del perimetro di warning (Figura 4.5), impostato agendo sui LiDAR del KMR mediante apposito software, in modo da prevedere ed evitare collisioni. Si può notare che le aree definite sono due:

- area di warning: definita in modo asimmetrico per consentire all'operatore di avvicinarsi al manipolatore nella posizione di guida manuale, ma abbastanza ampia da permettere un monitoraggio della presenza di ostacoli durante l'esecuzione dell'applicazione;
- area di arresto: area simmetrica inviolabile che causa l'arresto immediato del robot in modo da evitare possibili collisioni con l'ambiente e l'operatore.

Quando l'area di warning viene violata, anche la velocità massima consentita della base mobile subisce una modifica in modo da rallentare il movimento per enfatizzare l'aumento di rigidità del manipolatore e consentire all'operatore di eseguire una manovra correttiva della traiettoria percorsa.

Si vuole sottolineare che per la posizione del manipolatore adottata, l'applicazione del controllo di impedenza al manipolatore (con conseguente movimento relativo rispetto alla piattaforma durante gli spostamenti) e una maggiore vicinanza dell'operatore al robot durante la guida manuale, sono state modificate le configurazioni di sicurezza standard e le distanze di sicurezza dei LiDAR a bordo robot.

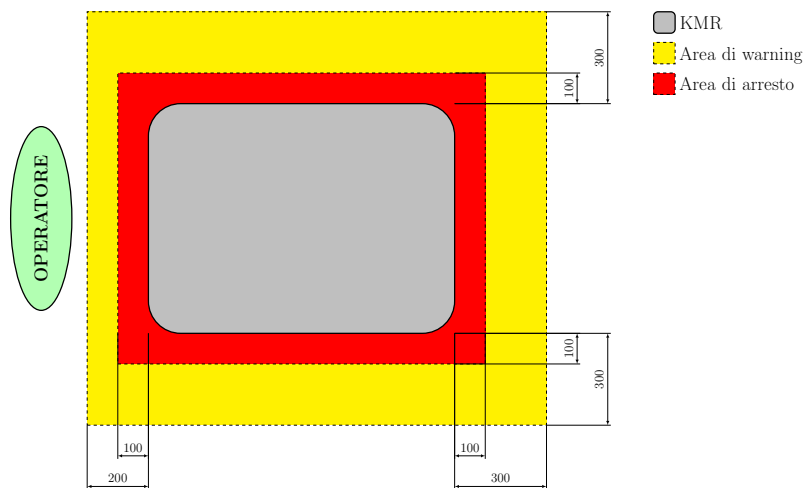


Figura 4.5: Area di warning e di arresto robot.

4.1 Utilizzo della guida manuale

Per eseguire la guida manuale del robot mobile sono necessari i seguenti passi:

- attivazione dell'applicazione tramite smartPad;
- conferma dell'avvio con domanda a schermo, in caso di risposta affermativa l'esecuzione continua;
- scelta del tipo di guida manuale da eseguire selezionando sul touch screen tra le opzioni:
 - Amm. proporzionale
 - Amm. oscillatore
 - Posizione
- viene data comunicazione a display del movimento del manipolatore che si porta al frame di riferimento per l'inizio dell'interazione fisica;
- appare a display la comunicazione "In attesa di un tocco", se in un intervallo di 5 s non avviene un contatto con l'LBR, l'applicazione chiede all'utente se è giunta al termine mediante un messaggio a display che consente la scelta di terminare l'applicazione oppure di proseguirla, in questo caso il sistema si riporta in stato di attesa;
- guida manuale attraverso la presa con la mano della flangia del manipolatore;
- per terminare il movimento collaborativo è sufficiente interrompere il contatto con il manipolatore (la dinamica che ne consegue dipende dal tipo di controllo selezionato in precedenza), apparirà nuovamente il messaggio "In attesa di un tocco" e dopo 5 s avverrà la richiesta di conclusione dell'applicazione.

Capitolo 5

Strategie di controllo

I controlli di velocità e posizione del robot risultano non accessibili e non modificabili perciò l'utilizzo di un controllo diverso da quello di default è stato ottenuto tramite l'elaborazione degli input in modo da generare i riferimenti di posizione o velocità da assegnare al controllore. I tre tipi di controllo di seguito esposti sono quindi composti da un sistema di sensori rappresentato dal manipolatore LBR, un modello di dinamica virtuale Y_v , per l'elaborazione dei dati rilevati, e dal controllo di movimentazione interno alla base mobile KMP, in Figura 5.1 si può notare che l'utente, durante l'interazione fisica con il sistema, riceve due feedback dati dalla velocità/entità dello spostamento della base mobile e dalle forze/coppie con cui risponde il manipolatore controllato in impedenza. Il comportamento completo del sistema robotico viene quindi percepito dall'uomo come una dinamica apparente Y_a .

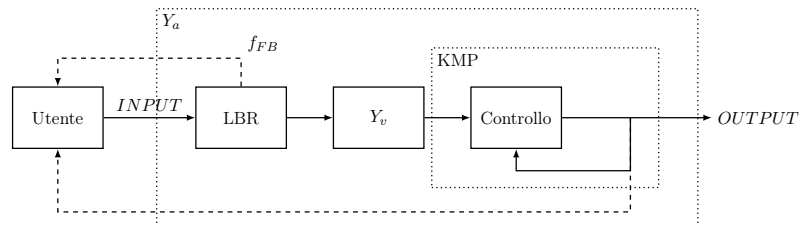


Figura 5.1: Schema generalizzato del sistema di interazione.

5.1 Modello proporzionale

Si vuole implementare un controllo di ammettenza “semplice” a livello computazionale con il quale ottenere in uscita una velocità proporzionale alla forza applicata in ingresso. In Figura 5.2 viene rappresentato lo schema completo del sistema di interazione.

Il modello adottato per determinare la velocità desiderata v_d per il singolo movimento è dato dalla relazione:

$$v_d = f_H \cdot k_p \quad (5.1)$$

dove f_H è la forza rilevata dal manipolatore e k_p è il guadagno proporzionale. Il controllo di impedenza del manipolatore viene applicato in modo tale che, una volta cessata l'interazione con l'uomo, l'LBR ritorni nella posizione di partenza.

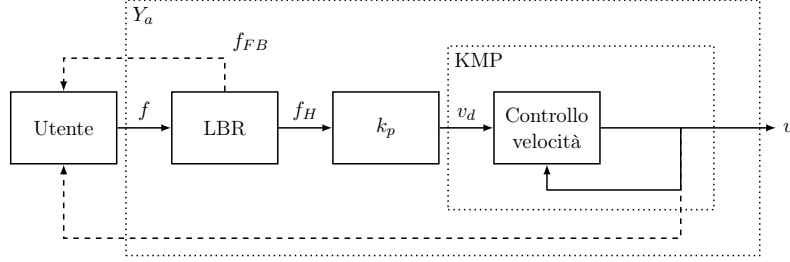


Figura 5.2: Schema di interazione con modello proporzionale.

5.2 Modello con oscillatore semplice smorzato

Si vuole ottenere un controllo di ammettenza in cui il modello della dinamica virtuale è quello di un oscillatore semplice smorzato. L'applicazione di tale modello comporta la necessità di compiere una discretizzazione dello stesso per poter essere implementato nell'algoritmo di controllo. In Figura 5.3 viene rappresentato lo schema completo del sistema di interazione.

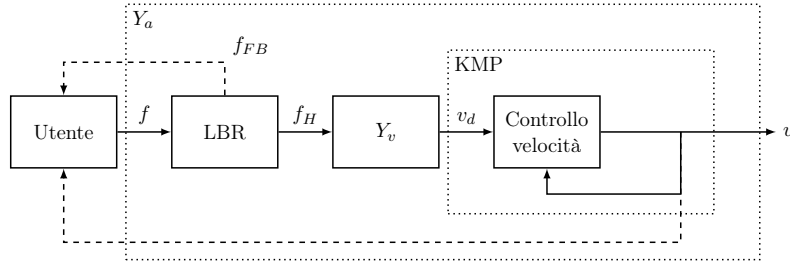


Figura 5.3: Schema di interazione con modello di oscillatore.

Il controllo di impedenza del manipolatore viene applicato in modo tale che, una volta cessata l'interazione con l'uomo, l'LBR ritorni nella posizione di partenza.

L'equazione monodimensionale di ammettenza è:

$$f_H(t) = m_v(\ddot{x}(t) - \ddot{x}_0(t)) + c_v(\dot{x}(t) - \dot{x}_0(t)) + k_v(x(t) - x_0(t)) \quad (5.2)$$

dove $f_H(t)$ è la forza di interazione (la forza applicata dall'operatore rilevata dall'LBR), m_v è la massa virtuale, c_v è la costante di smorzamento viscoso virtuale, k_v è la rigidezza virtuale, $x_0(t)$ è la condizione di equilibrio e $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ sono rispettivamente posizione, velocità e accelerazione. Dato che si vuole ottenere uno spostamento libero, k_v , $x_0(t)$, $\dot{x}_0(t)$ e $\ddot{x}_0(t)$ sono imposte nulle. L'equazione di ammettenza è quindi riscritta come:

$$f_H(t) = m_v \ddot{x}(t) + c_v \dot{x}(t) \quad (5.3)$$

Utilizzando un controllo di velocità, la velocità desiderata può essere scritta nel dominio di Laplace:

$$\dot{X}_d(s) = V_d(s) = \frac{F_H(s)}{m_v s + c_v} = F_H(s) Y_v(s) \quad (5.4)$$

dove $\dot{X}_d(s)$, $F_H(s)$ sono rispettivamente le Laplace trasformate di $\dot{x}(t)$ e $f_H(t)$ mentre $Y_v(s)$ rappresenta la dinamica virtuale del sistema. In questo sistema

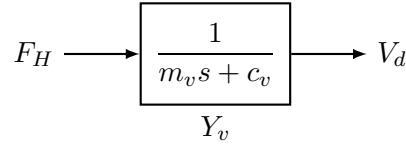


Figura 5.4: Sistema di interazione ad anello aperto.

ad anello aperto (Figura 5.4), si assume che l'operatore applichi semplicemente la forza di interazione. Data una forza in ingresso, la velocità a regime sarà minore per uno smorzamento virtuale maggiore. La massa virtuale ha un effetto passa-basso, in questo modo filtra il rumore del sensore di forza ed eventuali brusche variazioni della forza di interazione. Tuttavia, se la massa virtuale è troppo elevata, la cooperazione tra uomo e robot diventa controintuitiva poiché l'accelerazione della base mobile richiede tempo e una volta in moto risulta difficile opporvisi.

5.2.1 Oscillatore semplice smorzato

In Figura 5.5 è rappresentato un oscillatore semplice smorzato composto da una massa m , una molla con costante elastica k e uno smorzatore viscoso con costante di smorzamento viscoso c .

$$F(t) - c\dot{x}(t) - kx(t) = m\ddot{x}(t) \quad (5.5)$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{F(t) - c\dot{x}(t) - kx(t)}{m} \quad (5.6)$$

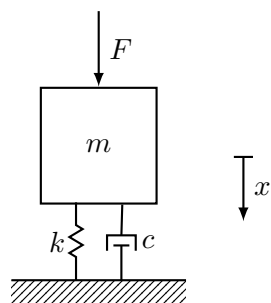


Figura 5.5: Oscillatore semplice smorzato.

Viene definito un cambio di variabili:

$$\begin{cases} x = x_1 \\ \dot{x} = x_2 \end{cases} \quad (5.7)$$

Ne risulta che (omettendo la dipendenza dal tempo):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{x} \\ = \frac{F - c\dot{x} - kx}{m} \\ = \frac{F - cx_2 - kx_1}{m} \end{cases} \quad (5.8)$$

Riassumendo:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{F - cx_2 - kx_1}{m} \end{cases} \quad (5.9)$$

5.2.2 Discretizzazione

Si vogliono ottenere delle equazioni alle differenze (quindi a tempo discreto) che possono essere implementate nel codice del controllo in modo da ottenere la soluzione del comportamento del sistema in modo numerico iterativo con passo k e periodo di campionamento T_s . Utilizzando l'approssimazione della derivata:

$$\dot{x} \cong \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (5.10)$$

Dalle 5.9 si ricava:

$$\begin{cases} x_2(k) = \frac{x_1(k+1) - x_1(k)}{T_s} \\ \frac{x_2(k+1) - x_2(k)}{T_s} = \frac{F(k) - cx_2(k) - kx_1(k)}{m} \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + T_s x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + T_s \frac{F(k) - cx_2(k) - kx_1(k)}{m} \end{cases} \quad (5.12)$$

Infine:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + T_s x_2(k) \\ x_2(k+1) = -\frac{T_s k}{m} x_1(k) + \left(1 - \frac{T_s c}{m}\right) x_2(k) + \frac{T_s}{m} F(k) \end{cases} \quad (5.13)$$

Le 5.13 permettono di descrivere l'evoluzione ad un passo della posizione e della velocità del sistema.

Confronto con Simulink

Si vuole verificare la bontà del modello discretizzato mediante un confronto con il modello Simulink equivalente della dinamica virtuale del sistema. Viene definito il modello dinamico virtuale applicato al singolo movimento (Figura 5.6). Per un

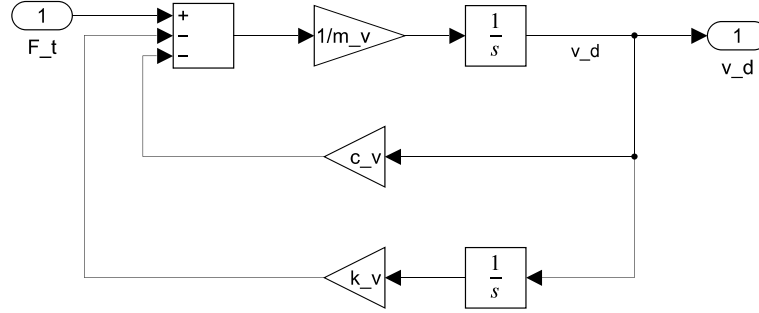


Figura 5.6: Schema Simulink per la dinamica virtuale.

ingresso in forza F_t il modello restituisce in uscita una velocità v_d da considerarsi velocità desiderata per lo spostamento del sistema reale. I parametri presenti nello schema definiscono:

- m_v la massa virtuale;
- c_v il costante di smorzamento viscoso virtuale;
- k_v la rigidezza virtuale.

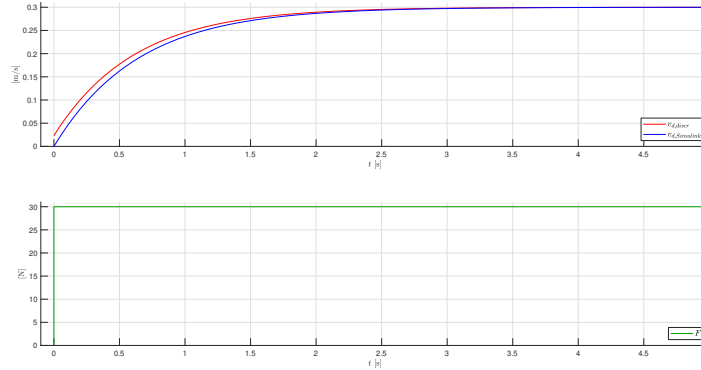


Figura 5.7: Confronto risposta gradino tra algoritmo e Simulink.

All'applicazione di un gradino in forza di ampiezza 30 N, ampiezza media stimata delle forze ottenute nell'interazione con il manipolatore, il modello discretizzato risponde con una dinamica del primo ordine ottenendo a regime lo stesso valore del modello simulato.

5.3 Controllo di posizione

Questo tipo di controllo, pensato per uno spostamento contenuto e un posizionamento preciso del KMR, sfrutta la deviazione lineare in posizione rispetto al frame di partenza della flangia del manipolatore per definire gli spostamenti da eseguire lungo gli assi x_b e y_b della base mobile. Per quanto riguarda la rotazione attorno all'asse z_b , viene invece valutata l'entità della rotazione della flangia, ossia del giunto A7 del manipolatore. In Figura 5.8 è riportato lo schema dell'interazione che avviene con questo metodo collaborativo, la deviazione δ generata dall'utente viene misurata attraverso il manipolatore e il valore ottenuto δ_H viene fornito al controllo di posizione del robot mobile che genererà in uscita lo spostamento s .

A differenza delle strategie precedenti, il controllo di impedenza del manipolatore viene applicato in modo tale che ad intervalli di 1 s venga registrata e mantenuta la posizione attuale e non ritorni a quella di partenza; questo permette di valutare di volta in volta la nuova deviazione in posizione assegnata e perciò di ottenere un riferimento assoluto della posizione del sistema robotico rispetto al frame iniziale assegnato alla flangia.

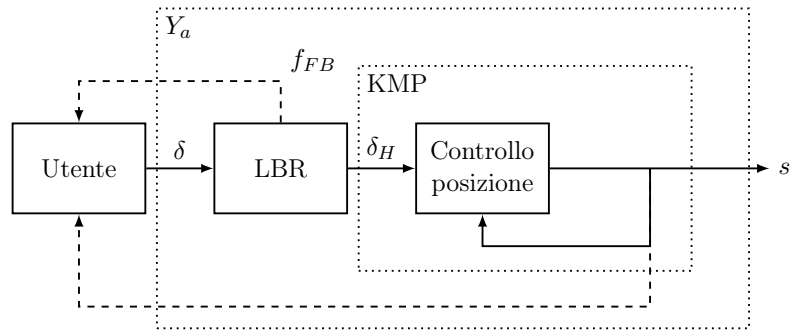


Figura 5.8: Schema di interazione con controllo di posizione.

Capitolo 6

Implementazione software in ambiente KUKA

La programmazione del KMR iiwa 14 R820 omniMove avviene tramite il software Sunrise Workbench. Di seguito verrà illustrata la struttura del programma implementato e ne verranno analizzati i principali metodi definiti per ottenere il controllo del robot.

6.1 Struttura

La struttura del codice utilizzato per il controllo del robot si rifà a quella di una macchina a stati finiti¹ (Figura 6.1).

La FSM è implementata all'interno di un metodo definito `coMove()` mediante

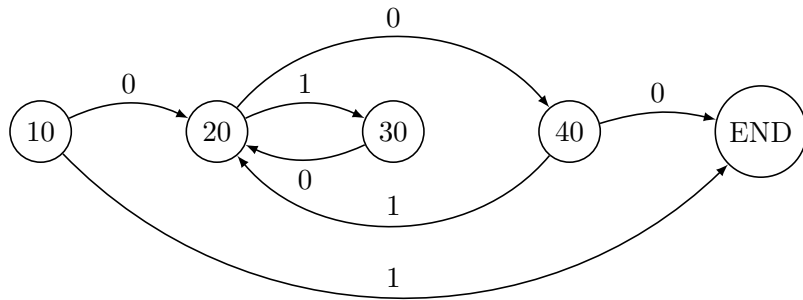


Figura 6.1: Struttura macchina a stati finiti.

un enunciato *switch*. Il metodo `coMove()` viene invocato nell'esecuzione del

¹Un automa a stati finiti (ASF o FSA, dall'inglese finite state automaton, al plurale: f. s. automata) o macchina a stati finiti (FSM, dall'inglese finite state machine) è un modello matematico di calcolo: è un tipo di automa che permette di descrivere con precisione e in maniera formale il comportamento di molti sistemi.

metodo `run()` definito di default come metodo principale. Nello specifico, ogni stato richiama uno o più metodi in modo da impartire dei comandi al robot o interagire con l'utilizzatore tramite l'interfaccia (smartHMI) a disposizione sullo smartPAD. Si illustra ora un esempio di possibile esecuzione dell'applicazione, seguendo l'ordine definito nella macchina a stati e descrivendo i metodi utilizzati:

- **10:** Viene invocato il metodo `askForSensing()` mediante il quale si richiede all'operatore di confermare l'intenzione di eseguire il movimento collaborativo e di selezionare quale metodo utilizzare, in caso negativo l'esecuzione del programma si conclude.
In caso di esito positivo, viene data una comunicazione a schermo della movimentazione del manipolatore che va a posizionarsi nel frame iniziale per l'interazione, si passa quindi allo stato successivo (20).
- **20:** In questo stato di "attesa" viene invocato il metodo `waitTouch()` con il quale si attende per 5 s che venga esercitata una forza/coppia alla flangia del manipolatore verificandone la presenza ad intervalli di 500 ms. Se non viene rilevata alcuna forza/coppia si passa allo stato di richiesta di conclusione dell'applicazione (40), in caso contrario si passa allo stato di movimento collaborativo (30).
- **30:** In questo stato avviene il movimento collaborativo. A prescindere dal metodo scelto nello stato (10) viene invocato il metodo `laser()` con il quale si verifica la presenza di ostacoli all'interno dello spazio di *warning* della base mobile e di conseguenza vengono definite la rigidità del manipolatore e la velocità massima del robot mobile. In base al tipo di interazione scelta precedentemente, si invoca poi uno dei seguenti metodi:
 - `forceMoveProp()`: controllo di ammettenza con modello proporzionale;
 - `forceMoveOsc()`: controllo di ammettenza con modello di oscillatore semplice smorzato;
 - `devSpst()`: controllo di posizione proporzionale alla deviazione della flangia.

Ogni metodo si conclude quando viene meno la condizione per il movimento della base mobile. Si torna quindi allo stato di "attesa" (20).

- **40:** Questo stato viene raggiunto quando il metodo `waitTouch()` non ha rilevato forze o coppie nell'intervallo di tempo massimo preimpostato, viene quindi invocato il metodo `quitApp()` che chiede all'operatore se concludere l'esecuzione dell'applicazione oppure se tornare in stato di "attesa" (20).

6.2 Metodi per la guida manuale

6.2.1 forceMoveProp()

Lo spostamento avviene con controllo di ammettenza proporzionale. All'interno di un ciclo *while* viene dapprima richiamato il metodo `laser()` per la verifica della presenza di ostacoli e la conseguente assegnazione dei valori di velocità massima al robot mobile e di rigidità al manipolatore; successivamente vengono rilevate le forze in direzione x_m ed y_m e la coppia esercitata al giunto A7, i loro valori vengono moltiplicati per i coefficienti di proporzionalità k_p scelti. I risultati ottenuti, rappresentanti le velocità desiderate, vengono assegnati ad un *array* per l'esecuzione del comando di movimentazione in velocità jog. Per garantire la sicurezza durante la manipolazione, il metodo `laser()` viene invocato ad ogni ciclo.

Nel caso in cui, durante la manipolazione, venga meno la condizione di avere almeno una tra le forze e la coppia rilevate superiori ad un valore di soglia minimo preimpostato (condizione in cui l'operatore non è più a contatto con la flangia) si assegnano valori nulli alle velocità e si causa l'interruzione del ciclo *while*; il processo entra di conseguenza nello stato di attesa (20).

6.2.2 forceMoveOsc()

Lo spostamento avviene con controllo di ammettenza con modello di oscillatore semplice smorzato. All'interno di un ciclo *while* viene dapprima richiamato il metodo `laser()` per la verifica della presenza di ostacoli e la conseguente assegnazione dei valori di velocità massima al robot mobile e di rigidità al manipolatore; successivamente vengono rilevate le forze in direzione x_m ed y_m e la coppia esercitata al giunto A7 e i loro valori vengono assegnati al modello discretizzato dell'oscillatore di cui viene riportato il codice per l'asse x:

```
x11 = x1 + ts*x2; //posizione
//velocità
x21 = (-ts*k_v/m_v)*x1 + (1 - ts*c_v/m_v)*x2 + (ts/m_v)*fx;
fx = forceInX; //forza
x1 = x11; //aggiornamento posizione
x2 = x21; //aggiornamento velocità
```

I risultati ottenuti vengono assegnati ad un *array* per l'esecuzione del comando di movimentazione in velocità jog. Per garantire la sicurezza durante la manipolazione, il metodo `laser()` viene invocato ad ogni ciclo.

Nel caso in cui, durante la manipolazione, venga meno la condizione di avere almeno una tra le forze e la coppia rilevate superiori ad un valore di soglia minimo preimpostato (condizione in cui l'operatore non è più a contatto con la flangia) e che almeno una tra le velocità di controllo sia superiore al valore di velocità minima consentita, si assegnano valori nulli alle velocità e si causa l'interruzione del ciclo *while*; il processo entra di conseguenza nello stato di attesa (20).

6.2.3 devSpost()

Lo spostamento avviene con controllo di posizione. All'interno di un ciclo *while* viene dapprima richiamato il metodo `laser()` per la verifica della presenza di ostacoli e la conseguente assegnazione dei valori di velocità massima al robot mobile e di rigidità al manipolatore; successivamente viene applicato il controllo di impedenza al manipolatore tramite l'opzione `positionHold` del metodo standard `move` in modo tale che venga mantenuta la posizione assegnata dall'operatore anche al termine del contatto. Vengono misurate le deviazioni in posizione della flangia rispetto al frame di partenza e, se almeno uno di tali valori risulta maggiore di una soglia minima, si procede con il movimento della base mobile. Per l'assegnazione della posa da raggiungere, viene dapprima rilevata la posa attuale (usando come riferimento l'origine della mappa di default del robot mobile) a cui vengono poi sommate le deviazioni della flangia del manipolatore. Il movimento avviene tramite il metodo di sistema `VirtualLineMotion(start, goal)` che elabora la traiettoria rettilinea da compiere per raggiungere la posa "goal" a partire dalla posa "start" e compiendo l'eventuale rotazione del robot mobile attorno all'asse z_b durante lo spostamento. Per garantire la sicurezza durante la manipolazione, il metodo `laser()` viene invocato ad ogni ciclo. Nel caso in cui, durante la manipolazione, venga meno la condizione di avere almeno una tra le forze e la coppia rilevate superiori ad un valore di soglia minimo preimpostato (condizione in cui l'operatore non è più a contatto con la flangia) avviene l'interruzione del ciclo *while*; il processo entra di conseguenza nello stato di attesa (20).

6.3 Metodi ausiliari

6.3.1 zero()

Questo metodo viene invocato all'interno del metodo `waitTouch()` posto allo stato (20). La sua funzione è quella di rilevare forze e coppie applicate al manipolatore quando questo è libero dal contatto con l'operatore e registrare tali valori di offset da sottrarre durante le misurazioni successive in modo da ottenere un riferimento iniziale nullo in forza e coppia. Le misure sono fatte con le apposite funzioni del manipolatore e sono relative al frame `ReferenceFrame`.

L'invocazione avviene ogni qualvolta si raggiunge lo stato (20), in questo modo vengono resettati i valori di offset che possono subire variazioni dovute alla diversa posizione del sistema robotico.

Viene di seguito riportato il codice del metodo:

```
public void zero() throws Exception
{
    //Compensazione offset forze e coppie
    //Rilevazione forze alla flangia rispetto al ReferenceFrame
    zerodata = lBR_iiwa_14_R820_1.
```

```

    getExternalForceTorque(lBR_iiwa_14_R820_1.getFlange(),
    getApplicationData().getFrame("/ReferenceFrame"));
    Vector zeroforce = zerodata.getForce(); //Vettore delle forze
    zeroforceInX = zeroforce.getX(); //Valore della forza in x
    zeroforceInY = zeroforce.getY(); //Valore della forza in y

    //Rilevazione della coppia alla flangia (giunto 7)
    zeroDataJoint = lBR_iiwa_14_R820_1.getExternalTorque();
    //Valore della coppia al giunto 7
    zeroTorqueJ7 = zeroDataJoint.getSingleTorqueValue(JointEnum.J7);

    return;
}

```

6.3.2 laser()

Questo metodo serve per fornire un feedback in forza variabile all'utente durante la manipolazione, in modo da avvertirlo della presenza di un ostacolo all'interno dello spazio di warning, definito con l'apposito programma CDS SICK che permette di interfacciarsi con i LiDAR a bordo robot. Il comportamento voluto si ottiene intervenendo su due parametri: la rigidità del manipolatore e la velocità massima con cui la base mobile può muoversi.

L'invocazione avviene una prima volta all'interno dello stato (30), per una verifica iniziale, e successivamente all'interno del ciclo *while* del metodo collaborativo scelto.

Per ottenere un controllo con impedenza variabile del manipolatore durante la guida manuale con controllo di ammettenza, viene utilizzato il pacchetto opzionale Sunrise.Servoing e in particolare la classe di movimento SmartServo. La modifica dei valori di rigidità dei giunti dell'LBR durante l'esecuzione del programma avviene con il metodo `changeControlModeSettings()` al quale vengono assegnati i valori di rigidità definiti nella variabile `jointImp`.

In modo analogo vengono assegnati i valori di rigidità del manipolatore per il controllo di posizione, ma questi verranno effettivamente applicati all'interno del metodo `devSpout()`.

Anche le velocità massime del robot mobile vengono assegnate definendone i valori con due tipi diversi di variabile. Questa differenza è dovuta al diverso comando di movimento utilizzato nel controllo di ammettenza e nel controllo di posizione, rispettivamente `jog` e `VirtualLineMotion`.

Si vuole fornire anche un feedback visivo all'operatore, sebbene limitato dall'interfaccia a disposizione, della violazione dello spazio di warning. Questo avviene con una scritta sul display composta da "warning = " seguita dal valore `true` della variabile booleana `warning`.

Viene di seguito riportato il codice del metodo:

```
public void laser() throws Exception
{
    //Acquisisco lo stato del segnale di sicurezza
    IMobilePlatformSafetyState state = kmP.getMobilePlatformSafetyState();
    warning = state.isWarningFieldBreach();
    if (warning == true)
    {
        //Violazione dello spazio di warning
        log.info("warning=" + warning); //Avviso a schermo
        //Rigidezze per controllo di ammettenza
        jointImp.setStiffness(200, 200, 300, 70, 300, 80, 12);
        //Rigidezze per controllo di posizione
        jointImpSpost.setStiffness(100, 100, 150, 35, 150, 20, 6);
        //Abbassa i limiti massimi velocità
        //Velocità massime per jog
        maxVelLin = 0.05; //% velocità massima lineare
        maxVelRot = 0.05; //% velocità massima rotazionale
        //Velocità % massime per VirtualLineMotion
        lim = new XYTheta(0.05,0.05,0.05);
    }
    else
    {
        //Rigidezze per controllo di ammettenza
        jointImp.setStiffness(100, 100, 200, 40, 200, 40, 6);
        //Rigidezze per controllo di posizione
        jointImpSpost.setStiffness(50, 50, 100, 20, 100, 10, 3);
        //Reimposta i limiti max velocità ai valori standard
        //Velocità massime per jog
        maxVelLin = 0.25; //% velocità massima lineare
        maxVelRot = 0.25; //% velocità massima rotazionale
        //Velocità % massime per VirtualLineMotion
        lim = new XYTheta(0.2,0.2,0.2);
    }
    //Applica il controllo di impedenza al manipolatore
    //per il controllo di ammettenza
    if(ctrlType == 0 || ctrlType == 1)
    {
        smartServoMotion.getRuntime().changeControlModeSettings(jointImp);
    }
    return;
}
```

Capitolo 7

Risultati sperimentali

Sono di seguito riportati i risultati sperimentali ottenuti per le tipologie di controllo implementate.

7.1 Controllo di ammettenza

Alcuni parametri risultano condivisi dalle due strategie di controllo:

- forza e coppia minime per il movimento, rispettivamente 4 N e 0.4 Nm;
- velocità massima;
- accelerazioni e decelerazioni massime;
- rigidzze del manipolatore.

Questo ne permette un confronto alla pari sebbene l'input in forza fornito dall'umano in contatto con il robot non possa avere una solida ripetitività. Si procederà comunque ad effettuare un confronto tra una singola forza di input e i due riferimenti di velocità dati dal modello di riferimento e dal controllo. Le prove effettuate, per una migliore leggibilità dei grafici, sono limitate a spostamenti lungo il solo asse x_b , resta valido che i risultati ottenuti valgono anche per la traslazione lungo l'asse y_b , la rotazione attorno all'asse z_b e la combinazione dei tre movimenti.

7.1.1 Modello proporzionale

In Tabella 7.1 sono riportati i parametri utilizzati per il controllo proporzionale¹. In Figura 7.1 viene eseguita una prova con violazione dello spazio di warning, i valori rappresentati sono:

¹Le rigidzze del manipolatore vengono definite rispettivamente per i giunti A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7.

Parametro	Standard	Warning
k_{px} [m/Ns]	0.01	0.01
k_{py} [m/Ns]	0.01	0.01
$k_{p\theta}$ [rad/Ns]	0.08	0.08
Rigidezze [Nm/rad]	100, 100, 200, 40, 200, 40, 6	200, 200, 300, 70, 300, 80, 12
$v_{lin,max}$ [m/s]	0.25	0.05
$v_{rot,max}$ [rad/s]	0.13	0.03

Tabella 7.1: Parametri per controllo con modello proporzionale.

- v_{dx} : velocità desiderata dal modello di riferimento lungo l'asse x_b ;
- v_{cx} : velocità controllata, con opportune saturazioni, lungo l'asse x_b ;
- v_{rx} : velocità reale raggiunta dal sistema lungo l'asse x_b ;
- F_x : forza applicata lungo l'asse x_b ;
- Warning: valore della variabile booleana rappresentante la violazione dell'area di warning.

Si può notare che all'applicazione di una forza di entità adeguata, la velocità massima raggiunta dalla base mobile satura al limite imposto di 0.25 m/s, nell'istante in cui avviene la violazione dello spazio di warning la velocità massima subisce una diminuzione al valore di sicurezza di 0.05 m/s, al contempo anche la rigidità del manipolatore aumenta, ne consegue una maggiore forza di interazione tra uomo e robot, all'uscita dell'ostacolo dall'area di warning, il robot può riprendere la sua corsa con velocità massima standard. Quando viene interrotto il contatto tra uomo e robot, questo arresta la sua corsa con decelerazione massima.

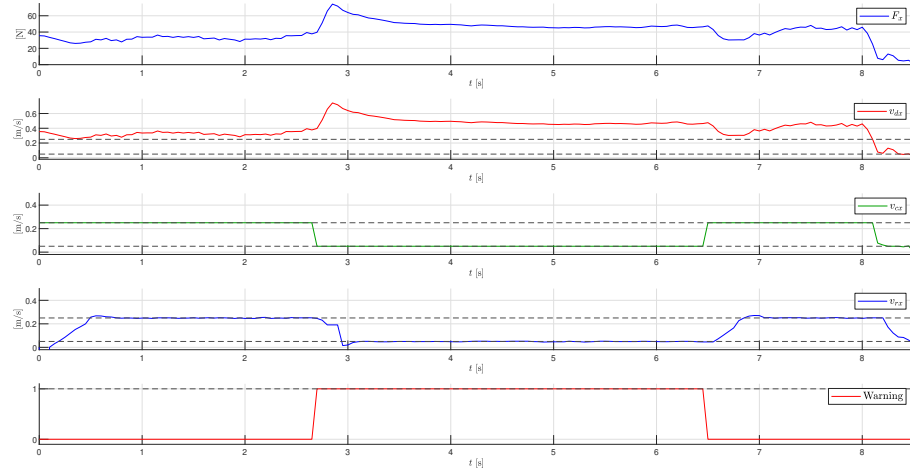


Figura 7.1: Prova con controllo di ammettenza proporzionale e violazione dell'area di warning.

7.1.2 Modello con oscillatore semplice smorzato

In Tabella 7.2 sono riportati i parametri utilizzati per il controllo con oscillatore semplice smorzato². I valori della massa virtuale m_v e della costante di smorzamento viscoso c_v assegnati al modello di riferimento, sono stati ottenuti

²Le rigidità del manipolatore vengono definite rispettivamente per i giunti A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7.

sperimentalmente: l'obiettivo è quello di ottenere un sistema con un'inerzia tale da poter essere percepita dall'utilizzatore, ma non troppo elevata da causare un effetto controintuitivo durante la manipolazione e non troppo bassa da portare a comportamenti instabili secondo le linee guida date in [4]; il valore del coefficiente di smorzamento è tale da permettere una dinamica fluida del sistema ma limitandone l'effetto di "scivolamento" che sarebbe causato da un valore troppo basso. In Figura 7.2 viene eseguita una prova con violazione dello spazio di

Parametro	Standard	Warning
m_v [kg]	≈ 64	≈ 64
k_v [N/m]	0	0
c_v [Ns/m]	100	100
Rigidezze [Nm/rad]	100, 100, 200, 40, 200, 40, 6	200, 200, 300, 70, 300, 80, 12
$v_{lin,max}$ [m/s]	0.25	0.05
$v_{rot,max}$ [rad/s]	0.13	0.03
v_{min} [m/s]	0.03	0.03

Tabella 7.2: Parametri per controllo con modello di oscillatore.

warning, i valori rappresentati sono:

- v_{dx} : velocità desiderata dal modello di riferimento lungo l'asse x_b ;
- v_{cx} : velocità controllata, con opportune saturazioni, lungo l'asse x_b ;
- v_{rx} : velocità reale raggiunta dal sistema lungo l'asse x_b ;
- F_x : forza applicata lungo l'asse x_b ;
- Warning: valore della variabile booleana rappresentante la violazione dell'area di warning.

Si può notare che all'applicazione della forza da parte dell'utente, la base mobile raggiunge la velocità massima consentita di 0.25 m/s con una dinamica che rispecchia quella imposta dal modello di riferimento. Nell'istante in cui avviene la violazione dell'area di warning, il sistema si porta alla velocità di sicurezza di 0.05 m/s con una lieve sottoelongazione, mentre all'interruzione del segnale, la velocità torna al valore standard con una lieve sovraelongazione. Si può anche notare come ci sia un aumento nella forza di interazione durante il passaggio per l'area di warning. All'interruzione del contatto con l'utente, il sistema prosegue la sua corsa, dovuta all'inerzia data dalla massa virtuale m_v , fino ad arrestare il movimento quando la velocità richiesta dal controllo raggiunge il valore di soglia minimo pari a 0.03 m/s.

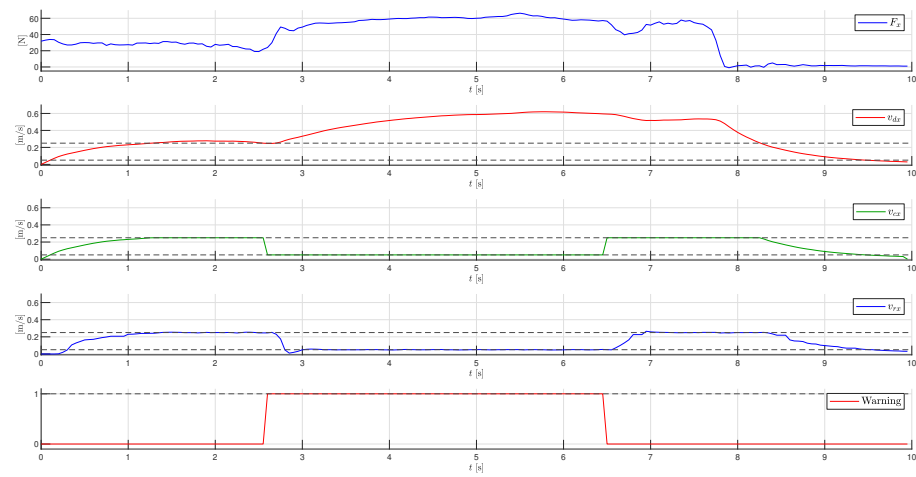


Figura 7.2: Prova con controllo di ammettenza con modello di oscillatore e violazione dell'area di warning.

Utilizzo con rigidezza

Si vuole ora utilizzare il modello dell'oscillatore ponendo la rigidezza virtuale k_v ad un valore maggiore di zero. L'utilizzo di una rigidezza impone che il sistema risulti ora vincolato e che tenda a tornare nella posizione iniziale quando subisce uno scostamento. In Figura 7.3 viene riportato l'andamento della forza applicata e della risposta in posizione del sistema quando la rigidezza virtuale k_v è pari a 60 N/m.

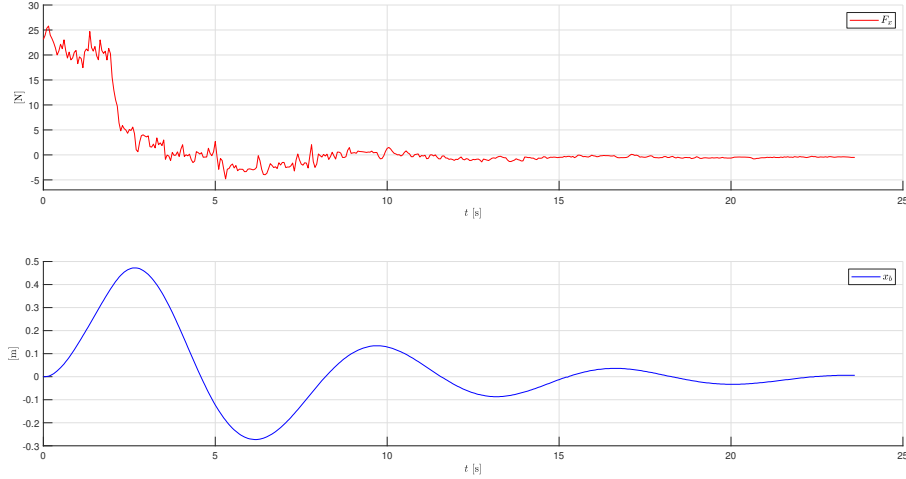


Figura 7.3: Modello di oscillatore con $k_v = 60$ N/m.

La stessa prova è stata effettuata anche con l'adozione del coefficiente di smorzamento critico del sistema:

$$c_v = 2\sqrt{k_v m_v} \cong 124 \text{ Ns/m} \quad (7.1)$$

il cui risultato è riportato in Figura 7.4. In entrambi i casi si può notare un lieve scostamento della posizione finale rispetto a quella iniziale, questo è dato dal limite di velocità minima di valore pari a 0.03 m/s per cui è consentito lo spostamento.

7.1.3 Confronto modelli

In Figura 7.5 viene effettuato un confronto tra i riferimenti ottenuti con i due diversi modelli all'applicazione di una forza, si possono distinguere le velocità desiderate ottenute dai modelli v_d e quelle con i limiti di velocità applicati v_c , per distinguere il modello proporzionale da quello con oscillatore sono utilizzati rispettivamente i pedici "p" e "o". In questo caso si valuta il sistema senza che avvenga una violazione dell'aera di warning.

Si può notare che, con i parametri utilizzati (si vedano Tabella 7.1 e Tabella 7.2), i livelli di velocità desiderata v_d siano molto simili, la differenza sostanziale sta

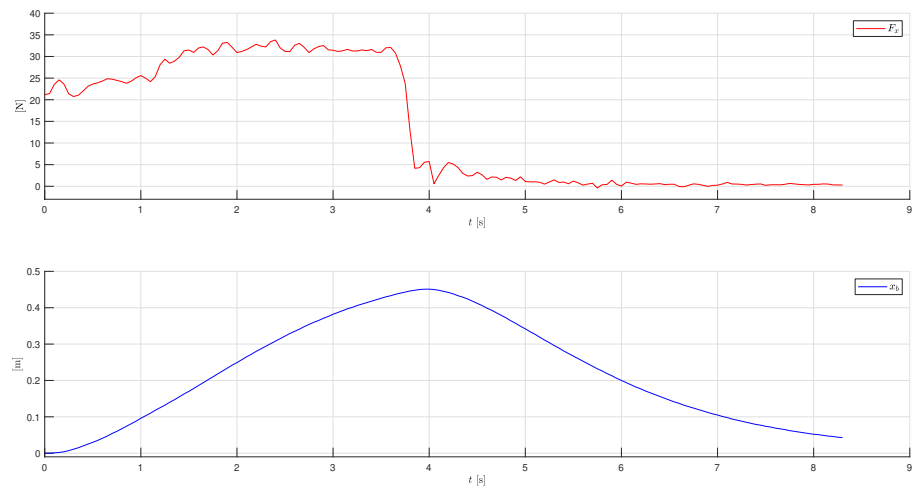


Figura 7.4: Modello di oscillatore con smorzamento critico.

nell'effetto filtrante del modello con oscillatore, sebbene comporti anche un certo ritardo.

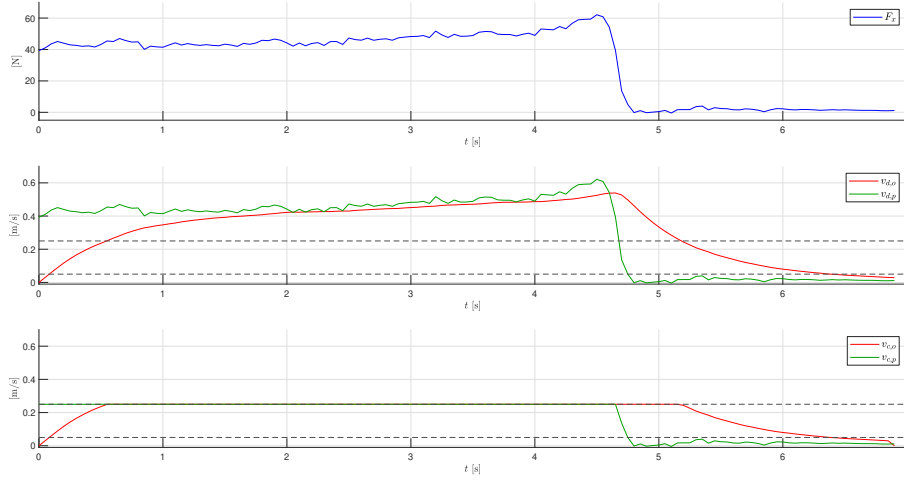


Figura 7.5: Confronto tra i modelli di riferimento proporzionale e oscillatore semplice smorzato.

7.2 Controllo di posizione

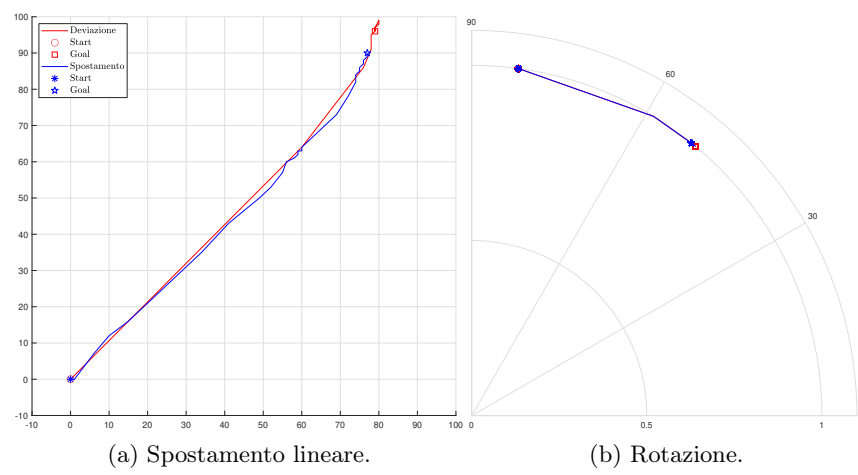
In Tabella 7.3 sono riportati i parametri utilizzati per il controllo di posizione³. In Figura 7.6 è riportato il risultato di uno spostamento combinato in x_b , y_b , θ ;

Parametro	Standard	Warning
Rigidezze [Nm/rad]	50, 50, 100, 20, 100, 10, 3	200, 200, 300, 70, 300, 80, 12
$v_{lin,max}$ [m/s]	0.16	0.04
$v_{rot,max}$ [rad/s]	0.24	0.06

Tabella 7.3: Parametri per controllo di posizione.

si può notare un lieve scostamento tra la posa “goal” definita dalla deviazione del manipolatore e quella raggiunta dal robot mobile, questo può essere causato da molteplici fattori tra cui il sistema di movimentazione (con ruote omnidirezionali), il metodo di rilevazione della distanza percorsa (basato su odometria) e le irregolarità della superficie del pavimento. Tuttavia, le differenze rilevate rispetto alla posizione desiderata, -2 mm lungo l’asse x_b , -6 mm lungo l’asse y_b e -0.02 rad di rotazione in θ , sono accettabili per il comportamento voluto.

³Le rigidezze del manipolatore vengono definite rispettivamente per i giunti A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7.

Figura 7.6: Spostamento in x_b , y_b , θ .

Conclusioni

Con il presente elaborato, si sono volute esplorare le potenzialità nell'utilizzo di un robot mobile collaborativo nella guida manuale e quali siano le strategie di controllo più adatte a questo tipo di interazione fisica, tra uomo e robot, sia quando la necessità è quella di uno spostamento di elevata entità, sia quando questo è limitato.

L'utilizzo del controllo di ammettenza con modello proporzionale ha permesso di rilevare una pronta risposta del sistema agli input in forza applicati ma, sebbene sia efficiente, il feedback percepito dall'utilizzatore risulta brusco. L'adozione di un diverso modello di riferimento per il calcolo delle velocità, dato da un oscillatore semplice smorzato, ha permesso di ottenere una risposta sufficientemente pronta del sistema con il vantaggio di un feedback all'utente più "naturale" rispetto al modello proporzionale, ottenendo complessivamente una migliore maneggevolezza. Inoltre, si possono determinare altri comportamenti del sistema andandone a variare i parametri di riferimento. In particolare, l'adozione di una rigidità positiva, permette di fissare una posizione iniziale del robot mobile, da cui questo può essere spostato dall'utilizzatore, per poi tornare alla posizione di partenza con un comportamento determinato dalla scelta dei parametri del modello.

Per spostamenti contenuti, è stato adottato un controllo di posizione. In tal modo, lo spostamento del robot mobile rispecchia quello della flangia del manipolatore mossa dall'utente e consente una visualizzazione diretta di ciò che si andrà ad ottenere dando la possibilità di correggere la posizione da raggiungere durante l'esecuzione dello spostamento.

L'utilizzo del controllo di impedenza sul manipolatore collaborativo a bordo robot, è risultato nettamente positivo sia per l'ergonomia raggiunta che per il feedback fisico ottenibile. Infatti, variando simultaneamente le rigidità del manipolatore e le velocità massime consentite per lo spostamento della piattaforma, a seconda che i sistemi di rilevamento dello spazio circostante al robot mobile riscontrino o meno la presenza di ostacoli, ha permesso l'ottenimento di un sistema di prevenzione delle collisioni che consente di correggere la traiettoria voluta dall'operatore, evitando così l'arresto del sistema dovuto alle impostazioni di sicurezza standard.

Potendo utilizzare una diversa interfaccia grafica, dedicata alla guida manua-

le, sono possibili ulteriori miglioramenti all'interazione. Ad esempio, un feedback visivo su display delle velocità ottenute con il controllo di ammettenza e dello spostamento raggiunto con il controllo di posizione.

I risultati ottenuti pongono vari spunti per lo sviluppo di ulteriori applicazioni in ambito industriale e per l'interazione con i robot mobili collaborativi nell'ambiente di lavoro, ad esempio, utilizzando il controllo di ammettenza con modello di oscillatore semplice, applicando una rigidità virtuale positiva ed impostando la costante di smorzamento viscoso al valore critico, si ottiene un comportamento tale che se il robot mobile è fermo in una posizione predefinita ma impedisce il passaggio dell'operatore, questo può spostarlo per agevolarsi il passaggio e poi, in autonomia, il robot si riporta alla sua posizione iniziale.

Un altro possibile sviluppo può riguardare l'intera flotta di robot mobili operanti nel medesimo impianto: se un operatore si avvicina a tal punto da violare lo spazio di warning del robot, o di altri sensori esterni, questo si pone in attesa per la guida manuale, il robot interessato dalla manipolazione può comunicare al resto della flotta il suo coinvolgimento e fornire aggiornamenti sulla sua posizione, permettendo così una rapida riorganizzazione del flusso di lavoro della flotta ed evitare un arresto della produzione.

Infine, c'è anche la possibilità di riprodurre il comportamento qui ottenuto nel caso di applicazioni di teleoperazione, dove manipolatore e robot mobile sono entità distinte e la guida della piattaforma mobile avviene da remoto utilizzando un manipolatore fisso. La possibilità di fornire un feedback fisico all'operatore risulterebbe importante in questo specifico caso, nel quale la visione dello spazio circostante al robot potrebbe essere maggiormente limitata.

Bibliografia

- [1] *A mobile revolution - How mobility is reshaping robotics*. International Federation of Robotics, June 2021.
- [2] I. Mourtou, A. Ibarguren, J. Kildal, L. Susperregi, and B. Sierra, “Human-robot collaboration in industrial applications: Safety, interaction and trust,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 25.05.2017.
- [3] A. Cappelli and E. Giovannetti, “L’interazione uomo-robot,” *The RoboCare Technical Reports*, November 2003.
- [4] A. Keemink, H. van der Kooij, and A. Stienen, “Admittance control for physical human-robot interaction,” *The International Journal of Robotics Research*, 2018.
- [5] KUKA Deutschland GmbH, *MA KMR iiwa omniMove V4*, 18.08.2020.
- [6] KUKA Roboter GmbH, *Spez LBR iiwa V5*, 28.01.2015.
- [7] KUKA Deutschland GmbH, *KUKA Sunrise.OS 1.16 SI V2*, 09.01.2019.
- [8] KUKA Deutschland GmbH, *KUKA Sunrise.Mobility 1.8*, 22.11.2018.
- [9] KUKA Deutschland GmbH, *KUKA.NavigationSolution 1.18*, 13.01.2021.
- [10] KUKA Deutschland GmbH, *KUKA Sunrise.Servoing 1.16*, 12.06.2018.
- [11] Wikipedia, “Cobot — Wikipedia, L’enciclopedia libera.” <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Cobot&oldid=121384128>.
- [12] A. Campeau-Lecours, M. Otis, and C. Gosselin, “Modeling of physical human-robot interaction: Admittance controllers applied to intelligent assist devices with large payload,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 21.05.2016.
- [13] “ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots.” <https://www.iso.org/standard/51330.html>.

-
- [14] “ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2: Robot systems and integration.” <https://www.iso.org/standard/41571.html>.
 - [15] “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices - Collaborative robots.” <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
 - [16] L. Maria, “Robots and humans can work together with new ISO guidance.” <https://www.iso.org/news/2016/03/Ref2057.html>.
 - [17] S. Karine, “What is ISO/TS 15066?.” <https://blog.robotiq.com/what-is-isots-15066>.
 - [18] A. Ajoudani, A. Zanchettin, S. Ivaldi, A. Albu-Schäffer, K. Kosuge, and et al., “Progress and prospects of the human-robot collaboration,” 2017.
 - [19] S. El Zaataria, M. Mareia, W. Lia, and Z. Usmanb, “Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview,” *Robotics and Autonomous Systems*, June 2019.

Elenco delle tabelle

1.1	Definizioni robot mobili.	3
1.2	Norme di sicurezza applicabili ai robot mobili.	12
3.1	Caratteristiche generali KMR.	25
3.2	Spostamenti base mobile.	26
4.1	Movimenti manuali.	33
7.1	Parametri per controllo con modello proporzionale.	52
7.2	Parametri per controllo con modello di oscillatore.	54
7.3	Parametri per controllo di posizione.	58

Elenco delle figure

1.1	LiDAR (Sick)	5
1.2	Tipologie di locomozione.	7
2.1	Schema semplificato del controllo di ammettenza disaccoppiato. .	16
2.2	Interconnessione robot-uomo.	18
3.1	KMR iiwa 14 R820 omniMove	23
3.2	Ruota Mecanum e dettaglio rotella.	25
3.3	Parti del robot e indicazione assi.	28
3.4	Esempio di rilevazione forza al TCP.	29
3.5	Separazione tra controllo operazioni e programmazione.	30
4.1	Posizione manipolatore per il movimento collaborativo.	31
4.2	Posizione durante la guida manuale.	32
4.3	Sistemi di riferimento adottati.	33
4.4	Trasformazione da sistema di riferimento World a ReferenceFrame.	34
4.5	Area di warning e di arresto robot.	35
5.1	Schema generalizzato del sistema di interazione.	37
5.2	Schema di interazione con modello proporzionale.	38
5.3	Schema di interazione con modello di oscillatore.	38
5.4	Sistema di interazione ad anello aperto.	39
5.5	Oscillatore semplice smorzato.	40
5.6	Schema Simulink per la dinamica virtuale.	42
5.7	Confronto risposta gradino tra algoritmo e Simulink.	42
5.8	Schema di interazione con controllo di posizione.	43
6.1	Struttura macchina a stati finiti.	45
7.1	Prova con controllo di ammettenza proporzionale e warning. . . .	53
7.2	Prova con controllo di ammettenza oscillatore e warning.	55
7.3	Modello di oscillatore con $k_v = 60$ N/m.	56
7.4	Modello di oscillatore con smorzamento critico.	57
7.5	Confronto tra i modelli di riferimento.	58

7.6	Spostamento in x_b , y_b , θ	59
-----	---	----