

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA



**Modellazione e sperimentazione di una strategia
di controllo di impedenza adattativa per
manipolatore industriale**

Relatore

Ing. Francesco BRAGHIN

Correlatore

Ing. Federico VICENTINI

Tesi di laurea di

Loris ROVEDA Matr. 749616

Anno Accademico 2011/2012

"Don't give in without a fight."
Hey You!, Pink Floyd

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore ing. Francesco Braghin e, in particolare, il mio correlatore ing. Federico Vicentini che più di chiunque altro mi ha saputo seguire, con pazienza, nel modo migliore, dandomi indicazioni e preziosi consigli.

Desidero ringraziare, inoltre, tutto il gruppo con cui mi sono trovato a lavorare in questo periodo, con particolare riferimento agli ing. Matteo Malosio e Nicola Pedrocchi.

Last but not least, un ringraziamento che viene dal cuore a tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni, fidanzata, famiglia e amici che hanno creduto in me e con cui ho condiviso gli anni più belli della mia vita.

Indice

1	Introduzione	1
2	Compliant Motion Control	3
2.1	Introduzione e stato dell'arte	3
2.2	LWR Kuka	9
2.3	Architettura di controllo del Kuka LWR	11
2.3.1	Modello dinamico	12
2.3.2	Controllo in coppia	13
2.3.3	Controllo in impedenza nello spazio operativo	14
2.4	Fast Research Interface	17
3	Modellazione del controllo di interazione	21
3.1	Introduzione	21
3.2	Definizione del sistema analizzato	28
3.3	Definizione del modello del sistema	29
3.3.1	Modellazione del sistema nel piano: 3 gdl	30
3.3.2	Interazioni elementari con l'ambiente	31
3.3.3	Analisi critica dei risultati ottenuti dal modello a 3 gradi di libertà	42
3.3.4	Confronto dei risultati al variare dei parametri di controllo associati al robot	43
3.3.5	Confronto dei risultati al variare dei parametri associati all'ambiente	45
3.3.6	Verifica sperimentale dei parametri del modello	47
3.3.7	Modellazione del sistema nello spazio: 6 gdl	74
4	Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo	77
4.1	Caso base: robot soffice e set-point di controllo predefinito	83
4.2	Aggiornamento continuo del set-point di controllo	88
4.3	Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo	92
4.3.1	Modifica posizione proporzionale a F/K	92
4.3.2	Modifica posizione proporzionale a $\delta \cdot F/K$	96
4.4	Risultati sperimentali	100
4.4.1	Strategia di spostamento continuo del set-point di controllo	100
4.4.2	Strategia di spostamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale	103
4.5	Applicazione della strategia a una geometria	106

5 Conclusioni e sviluppi futuri	109
Bibliografia	111

Elenco delle figure

2.1	controllo in forza esplicito	4
2.2	controllo in forza implicito	5
2.3	controllo ibrido	5
2.4	esempio di applicazione del controllo ibrido (task di <i>peg in hole</i>)	6
2.5	comportamento del controllo in ammettenza e del controllo in impedenza	7
2.6	controllo in impedenza	7
2.7	Kuka LWR c/o CNR-ITIA	9
2.8	modello elastico del giunto del Kuka LWR	12
2.9	LWR: anello di controllo interno di coppia e anello di controllo esterno, tratto da [3]	14
2.10	LWR: controllo in impedenza nello spazio operativo, tratto da [3]	16
2.11	architettura del sistema di controllo FRI	17
2.12	interazione tra FRI e <i>motion kernel</i>	17
2.13	variabili FRI per la comunicazione tra pc remoto e programma KRL	18
2.14	FRI: protocollo UDP	18
2.15	macchina a stati realizzata dalla FRI comprendente il <i>Monitor mode</i> e il <i>Command mode</i>	19
3.1	schematizzazione dell'ambiente mediante un sistema discreto di molle-smorzatori	22
3.2	controllo in impedenza	22
3.3	schema di controllo globale	23
3.4	LWR: controllo in impedenza nello spazio operativo (sistema equivalente)	23
3.5	schema di controllo globale on-line	24
3.6	schematizzazione dell'interazione robot-ambiente	25
3.7	geometria selezionata e relativa sede	28
3.8	schematizzazione della geometria trattata nel piano	30
3.9	schema di realizzazione della simulazione: tale schema sintetizza il flusso di esecuzione delle singole procedure elementari	32
3.10	definizione del riferimento fisso (in rosso), del riferimento all'effector (in verde) e del tool (cerchio verde)	35
3.11	procedura elementare A: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo	35
3.12	procedura elementare A: schema contatto (vedi paragrafo 3.1)	35
3.13	procedura elementare A: spostamenti e forze	36

3.14	procedura elementare B: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo	38
3.15	procedura elementare B: schema contatto	38
3.16	operazione B: spostamenti e forze	39
3.17	procedura elementare C: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo	40
3.18	procedura elementare C: schema contatto	40
3.19	posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto . .	41
3.20	posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto . .	44
3.21	posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto . .	46
3.22	verifica parametri di rigidezza realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	47
3.23	schema di comunicazione tra pc remoto e FRI	49
3.24	carico 37 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z	50
3.25	carico 45 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z	50
3.26	carico 65 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z	50
3.27	verifica parametri di smorzamento realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	51
3.28	spostamento in Z (K_Z 1000 [N/m], D_Z 0.1 [Ns/m])	53
3.29	spostamento in Z (K_Z 2500 [N/m], D_Z 0.1 [Ns/m])	53
3.30	spostamento in Z (K_Z 2500 [N/m], D_Z 0.7 [Ns/m])	53
3.31	decremento logaritmico	54
3.32	verifica frequenza naturale realizzata dal controllo in impedenza nello spazio operativo	55
3.33	accelerazione in direzione X, eccitazione in Z	58
3.34	accelerazione in direzione Y, eccitazione in Z	58
3.35	accelerazione in direzione Z, eccitazione in Z	58
3.36	stima della FRF del sistema per il grado di libert� X	60
3.37	stima della FRF del sistema per il grado di libert� Y	60
3.38	stima della FRF del sistema per il grado di libert� Z	60
3.39	spostamenti nel piano X - Z [0 - 10 Hz]	61
3.40	spostamenti Y - Z [0 - 1.75 Hz]	61
3.41	direzione di accoppiamento nel piano Y - Z	62
3.42	spostamenti Y - Z [1.75 - 2.75 Hz]	63
3.43	spostamenti Y - Z [2.75 - 4.75 Hz]	63
3.44	spostamenti Y - Z [4.75 - 5.75 Hz]	63
3.45	accelerazioni sui tre gradi di libert�	65
3.46	stima delle funzioni di risposta in frequenza per i tre gradi di libert�	66
3.47	spostamenti dell'end-effector nel piano X - Z, eccitazione lungo X	67
3.48	spostamenti dell'end-effector nel piano X - Y, eccitazione lungo X	68
3.49	spostamenti nel piano X - Y, eccitazione lungo Y	69
3.50	spostamenti nel piano Y - Z [0 - 1.25 Hz], eccitazione lungo Y . .	69
3.51	spostamenti Y - Z [1.25 - 2.5 Hz], eccitazione lungo Y	69
3.52	accelerazione lungo il grado di libert� rotazionale β	72
3.53	stima della FRF del sistema per il grado di libert� rotazionale β	73
3.54	sistema schematizzato nello spazio (in rosso � schematizzata la geometria trattata, mentre in blu la relativa sede)	75

4.1	direzione di esplorazione Z	78
4.2	direzione di esplorazione X e Y	79
4.3	rotazioni di esplorazione	80
4.4	definizione della posizione del tool (pallino verde) e del set-point di controllo (croce rossa)	83
4.5	andamenti gradi di libertà ottenuti (comportamento soffice) . . .	84
4.6	andamenti forze e coppie (comportamento soffice)	85
4.7	definizione della posizione del tool (pallino verde) e del set-point di controllo (croce rossa)	86
4.8	andamenti gradi di libertà (comportamento soffice)	86
4.9	andamenti forze e coppie (comportamento soffice)	87
4.10	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento continuo del set-point	89
4.11	andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento continuo del set-point	90
4.12	componente di spostamento lungo X del set-point comandato . .	91
4.13	componente di spostamento lungo Y del set-point comandato . .	91
4.14	componente di spostamento lungo Z del set-point comandato . .	91
4.15	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 1$	93
4.16	andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 1$	94
4.17	componente di spostamento lungo X del set-point comandato . .	95
4.18	componente di spostamento lungo Y del set-point comandato . .	95
4.19	componente di spostamento lungo Z del set-point comandato . .	95
4.20	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 0.5$	97
4.21	andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 0.5$	98
4.22	componente di spostamento lungo X del set-point comandato . .	99
4.23	componente di spostamento lungo Y del set-point comandato . .	99
4.24	componente di spostamento lungo Z del set-point comandato . .	99
4.25	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point	101
4.26	andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point	102
4.27	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale	104
4.28	andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale	105
4.29	geometria utilizzata per la realizzazione del task di inserzione per la verifica della generalità di applicazione della strategia	106

4.30	andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point, manipolando la nuova geometria	107
4.31	andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point, manipolando la nuova geometria	108

Elenco delle tabelle

3.1	parametri di rigidezza impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	33
3.2	parametri di smorzamento adimensionale impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	33
3.3	parametri associati all'ambiente per l'esecuzione della simulazione	33
3.4	parametri impostati per l'esecuzione della simulazione del task .	37
3.5	rigidezze impostate dal controllo in impedenza nello spazio operativo nelle tre diverse configurazioni	43
3.6	smorzamenti adimensionali impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo nelle tre diverse configurazioni	43
3.7	parametri associati all'ambiente per l'esecuzione della simulazione	43
3.8	parametri di rigidezza impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	45
3.9	parametri di smorzamento adimensionale impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo	45
3.10	parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di rigidezza realizzati dal controllo	48
3.11	parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di rigidezza realizzati dal controllo	48
3.12	carichi applicati all'end-effector del robot per l'esecuzione delle prove per la verifica dei parametri di rigidezza realizzati dal controllo	49
3.13	rigidezze ricavate dallo svolgimento della campagna di prove . . .	51
3.14	parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di smorzamento realizzati dal controllo	52
3.15	parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di smorzamento realizzati dal controllo	52
3.16	smorzamento adimensionale ricavato dallo svolgimento della campagna di prove per i diversi set-up definiti	54
3.17	parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove atte alla verifica della frequenza naturale del sistema controllato nella configurazione di esecuzione del task in esame	56

3.18	parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove atte alla verifica della frequenza naturale del sistema controllato nella configurazione di esecuzione del task in esame	56
3.19	accoppiamento tra i gradi di libertà Y e Z e angolo ellisse di moto nel relativo piano, con eccitazione imposta lungo Z	64
3.20	parametri di rigidezza impostati	64
3.21	parametri di smorzamento adimensionale impostati	65
3.22	accoppiamento tra i gradi di libertà Y e Z e angolo ellisse di moto nel relativo piano, con eccitazione imposta lungo Y	68
3.23	parametri di massa stimati	70
3.24	parametri di rigidezza impostati per l'esecuzione della prova sul grado di libertà β	71
3.25	parametri di smorzamento adimensionale impostati per l'esecuzione della prova sul grado di libertà β	72
3.26	Sintesi dei risultati ottenuti dalla verifica dei parametri di rigidezza	73
3.27	Sintesi dei risultati ottenuti dalla verifica dei parametri di smorzamento adimensionale	73
3.28	Sintesi dei risultati ottenuti dalla stima dei parametri di massa .	74
3.29	Sintesi dei risultati ottenuti dalla stima dei parametri di momento d'inerzia	74
4.1	Forze desiderate e relative tolleranze impostate	81
4.2	Coppie desiderate e relative tolleranze impostate	81
4.3	rigidezze impostate	83
4.4	smorzamenti adimensionali impostati	83
4.5	rigidezze impostate	88
4.6	smorzamenti adimensionali impostati	88
4.7	rigidezze impostate	92
4.8	smorzamenti adimensionali impostati	93
4.9	rigidezze impostate	96
4.10	smorzamenti adimensionali impostati	96
4.11	rigidezze impostate	100
4.12	smorzamenti adimensionali impostati	100
4.13	rigidezze impostate	103
4.14	smorzamenti adimensionali impostati	103
4.15	rigidezze impostate	106
4.16	smorzamenti adimensionali impostati	106

Abstract

Nella presente Tesi sono trattati gli aspetti caratterizzanti il *compliant motion control* di robot antropomorfi controllati in impedenza, in presenza di un ambiente (parzialmente) non noto geometricamente e meccanicamente. Viene analizzato lo stato dell'arte, realizzato un modello dinamico del sistema robot controllato-ambiente e sviluppate una serie di strategie di configurazione adattativa dei parametri di controllo che, sulla base dell'interazione locale instaurata tra il manipolatore e l'ambiente, consentono un adattamento del comportamento del robot alle condizioni locali di lavoro.

Il lavoro realizzato ha una duplice valenza. (1) Viene sviluppato un modello del sistema robot-ambiente che consente di avere fuori linea una simulazione del comportamento dinamico del sistema controllato, ovvero una stima della funzione di trasferimento tra moto del robot e forze scambiate. Data la non-linearità del sistema, viene discusso e sperimentato il range di validità di tale funzione, secondo la frequenza e la configurazione del manipolatore. In questo modo è possibile stimare le forze scambiate al contatto e utilizzare tali dati per lo sviluppo di algoritmi di controllo di un task locale. (2) Vengono sviluppate una serie di strategie di controllo *sensor-based* che, sulla base della lettura on-line delle forze scambiate tra robot e ambiente, consentono la definizione del comportamento dinamico desiderato del robot. La peculiarità di tali strategie risiede nello sfruttamento del controllo di impedenza e della variazione dei parametri secondo regole generali prefissate, demandando al controllore il calcolo specifico dei valori dei parametri di controllo.

La piattaforma utilizzata è il Kuka LWR, robot leggero di nuova generazione sviluppato per soddisfare i requisiti richiesti di cedevolezza controllata e per realizzare un'interazione con utenti.

La strategia è stata sviluppata sulla base di uno specifico task di inserzione di un componente rigido a contatto con un ambiente rigido, il quale presenta le caratteristiche proprie delle comuni applicazioni industriali. Il problema è stato trattato in una forma del tutto generale in modo tale da poter estenderne i risultati a un qualsiasi task.

I risultati ottenuti dall'implementazione degli algoritmi sviluppati mostrano un effettivo adattamento del comportamento dinamico del robot controllato alle caratteristiche locali di contatto, aprendo nuovi scenari per l'estensione delle strategie realizzate ad ambienti di lavoro soffici e alla cooperazione tra robot.

Abstract

In this Thesis *compliant motion control* topics are discussed for manipulators. Impedance control is used to control the manipulator in contact with a (partial) unknown environment. State of the art was analyzed. A dynamic model of the system controlled robot-environment was made in order to develop an adaptive configuration strategy of the control parameters, that allows an adaptation of the behavior of the robot to the local working conditions.

The work carried out has a double meaning. (1) The development of a dynamic model of the system robot-environment, that allows off-line simulation of the dynamic behavior of the controlled system, estimating the transfer function between the motion of the robot and forces exchanged. Given the non-linearity of the system, the range of validity of this function is discussed and tested, based on the frequency and configuration of the manipulator. This model allows the estimate of the local interaction forces, due to the contact, used for the development of control algorithms. (2) *Sensor-based* control strategies are developed that allow the definition of a desired dynamic behavior of the robot, based on the on-line measurement of contact forces. The peculiarity of this approach lies in the use of impedance control and variation of control parameters according to fixed general rules leaving the controller to calculate specific values of the control parameters.

The platform used is the Kuka LightWeight Robot, next-generation lightweight robot designed to meet the requirements of controlled stiffness and interaction with users.

The strategy was developed based on a specific assembly task of a rigid component in contact with a rigid environment. However, the problem is treated in a very general form, so that we can extend the results to any task.

The results obtained show an effective adaptation of the dynamic behavior of the controlled robot to the local contact, opening new scenarios for the extension of the developed strategies to soft environments and cooperation between robots.

Capitolo 1

Introduzione

Nella presente tesi viene sviluppata una strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo che consenta un adattamento del comportamento dinamico del robot, controllato in impedenza nello spazio operativo, in funzione dell'interazione instaurata con l'ambiente con cui è a contatto durante l'esecuzione del task.

Tale argomento risulta di particolare rilevanza scientifica in quanto è sempre più richiesto ai sistemi robotici di saper interagire con l'ambiente con cui si trovano in contatto, sia esso rappresentato da un operatore o da un qualsiasi sistema fisico. In particolare, applicazioni di questa natura rappresentano un *compliant motion control* che, a differenza del controllo in forza o del controllo in posizione, consente di realizzare un dato comportamento dinamico del robot, anziché definire riferimenti di forza o posizione. In questo modo, il sistema controllato può operare a contatto con un ambiente (parzialmente) non noto, ricercando, in funzione dei parametri di controllo impostati, una condizione di equilibrio dinamico. Il robot viene quindi, in modo controllato, reso cedevole e capace di adattarsi alle condizioni dinamiche imposte dall'ambiente di lavoro. Tale strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo è stata sviluppata sulla base di un task di inserimento, ma la relativa trattazione è rimasta generale, potendo essere estesa ad un qualunque task.

La piattaforma utilizzata è il Kuka LightWeight Robot, robot leggero di nuova concezione sviluppato per soddisfare le esigenze richieste per l'esecuzione di applicazioni in cui il sistema robotico deve interagire con l'ambiente di lavoro.

Per la definizione di una strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo, basandosi questa sull'interazione instaurata tra robot e ambiente, è stato necessario sviluppare un modello dinamico del sistema robotico controllato in impedenza nello spazio operativo. Ai fini dell'analisi del comportamento dinamico del sistema controllato, questo può essere rappresentato come un sistema massa-molla-smorzatore, i cui gradi di libertà possono considerarsi disaccoppiati nello spazio cartesiano. I relativi parametri di rigidità e smorzamento sono impostati da controllo. La modellazione dei contatti robot-ambiente è realizzata mediante sistemi molla-smorzatore.

Una verifica sui parametri associati al sistema controllato, quali rigidità e smorzamenti realizzati, parametri di massa e di frequenza naturale, è stata necessaria, in modo tale da modellare nel modo corretto il comportamento dinamico del sistema controllato. La verifica è stata effettuata per la configurazione in

cui il robot si trova durante l'esecuzione del task, non caratterizzando così il comportamento integrale del manipolatore.

Sulla base del modello sviluppato è stata realizzata la strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo, in modo tale da poter eseguire il task di inserimento indicato senza la necessità di modellare la geometria e le caratteristiche meccaniche dell'ambiente, ma facendo in modo che il sistema controllato modifichi i suoi parametri in modo tale da realizzare un voluto comportamento dinamico del sistema robotico.

Sviluppata la strategia off-line è stata, in ultimo, implementata e validata.

Più nel dettaglio, il capitolo 3 descrive lo stato dell'arte relativo al *compliant motion control*, effettuando una panoramica sulle diverse tipologie di controllo disponibili in letteratura. Quindi, prosegue con una descrizione della piattaforma utilizzata, indicandone le maggiori caratteristiche e analizzando la teoria alla base del controllo in impedenza nello spazio operativo nativamente disponibile su tale manipolatore.

Il capitolo 4 è definito il task realizzato e la relativa geometria. Tale capitolo è soprattutto dedicato alla modellazione del sistema controllato in interazione con l'ambiente, prima nel piano verticale, poi nello spazio. In ultimo, si effettua una verifica sperimentale relativa al comportamento dinamico realizzato dal controllore.

Il capitolo 5 descrive la strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo sviluppata, analizzando i risultati ottenuti dalle simulazioni realizzate sulla base del modello dinamico illustrato nel capitolo precedente e i risultati ottenuti dalla implementazione di tale strategia per l'esecuzione del task mediante il Kuka LWR.

Il capitolo 6 contiene le conclusioni tratte dal lavoro e i relativi sviluppi futuri.

Capitolo 2

Compliant Motion Control

2.1 Introduzione e stato dell'arte

Con *compliant motion control* ([21], [16], [18]) si fa riferimento ad una famiglia di strategie di controllo che consente la realizzazione di un determinato comportamento dinamico del robot in interazione con un ambiente. Non essendoci un riferimento di posizione o di velocità (*motion*) e risultando un equilibrio dinamico dal comportamento impostato dal controllore, il comportamento del robot è di natura cedevole controllato (*compliant*).

Tali strategie di controllo appartengono al controllo in forza in quanto utilizzano un feedback di forza. In senso stretto si differenziano, però, dal controllo di pura forza [31] e dal controllo di forza ibrido in quanto, anziché utilizzare il feedback di forza per il calcolo diretto dell'azione di controllo, utilizzano il feedback di forza per l'impostazione di un determinato comportamento dinamico.

Il controllo in forza puro è stato sviluppato per quelle applicazioni in cui il manipolatore realizza un contatto controllato con un ambiente. In questo caso, infatti, il controllo in posizione puro non consente il controllo delle azioni di interazione che si sviluppano a causa di eventuali contatti, e questo può portare il sistema all'instabilità. Ad esempio, in un task di sbavatura di componenti utilizzando un controllo in posizione puro è possibile riscontrare forze notevoli agenti sul manipolatore a causa della variazione del profilo del componente. Questo in quanto il sistema robotico tenta di inseguire un determinato riferimento di posizione: più l'errore risulta importante, più la forza attuata dal robot aumenta. L'interazione instaurata è figlia anche del tipo di ambiente con cui il manipolatore è in contatto. Se l'ambiente risulta rigido il robot non potrà penetrare in esso e le forze scambiate risultano elevate. Questo può portare all'instabilità del sistema e al relativo danneggiamento. Utilizzando invece un controllo in forza è possibile controllare l'interazione instaurata.

Considerando l'equazione dinamica di un generico manipolatore, il controllo in forza puro consente, sulla base di un feedback di forza, di inseguire un dato riferimento in modo da annullare il relativo errore, determinando l'azione di controllo \mathbf{u} che contiene le coppie erogate ai giunti:

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{f}_v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{f}_E \quad (2.1)$$

Utilizzando un feedback di forza si rende necessaria la presenza di un sensore in grado di misurare l'entità dell'interazione \mathbf{f}_E che si instaura durante l'esecuzione

del task.

Il controllo in forza puro consente il controllo delle forze sviluppate dal robot lungo i relativi gradi di libertà separatamente.

Due famiglie di schemi di controllo generali per i controlli di forza possono essere individuate:

- controllo in forza esplicito;
- controllo in forza implicito.

Lo schema del controllo in forza esplicito, Figura 2.1, prevede la chiusura di un unico anello di controllo, che utilizza come feedback le forze e le coppie misurate all'end-effector per il calcolo dell'azione di controllo \mathbf{u} , ovvero delle coppie da erogare ai giunti. Per eseguire tale operazione è necessario avere a disposizione un modello del manipolatore, ovvero un'equazione del tipo 2.1. Questo in quanto il calcolo dell'azione di controllo passa per l'equazione dinamica sopra riportata. Senza un modello sufficientemente valido del sistema l'azione di controllo può non risultare stabile e compromettere così l'esecuzione del task.

Lo schema di controllo in forza implicito, Figura 2.2, prevede la chiusura di due anelli di controllo: un anello di forza esterno ed un anello di posizione interno. L'anello di forza esterno consente il calcolo di un riferimento di posizione, il quale viene utilizzato a sua volta dall'anello di posizione interno per il calcolo dell'azione di controllo. Il blocco che calcola il riferimento di posizione in funzione del feedback di forza realizza di fatto un'ammettenza meccanica.

Grazie allo schema di controllo che definisce tale strategia, non essendo necessaria la conoscenza del modello dinamico del manipolatore (generalmente non facile da ottenere a causa di parametri fortemente non lineari, quale l'attrito), il controllo in forza implicito trova un'applicazione maggiore rispetto al controllo di forza esplicito.

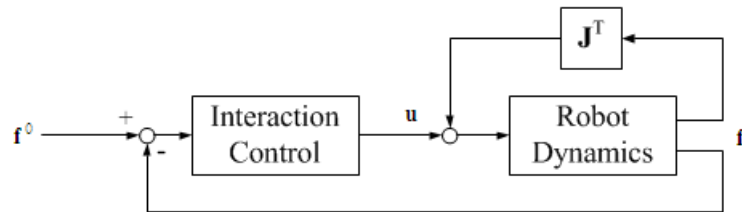


Figura 2.1: controllo in forza esplicito

Il problema associato al controllo in forza puro è dovuto al fatto che, in generale, durante l'esecuzione di un'applicazione, il robot esercita una forza sull'ambiente lungo alcune direzioni, mentre in altre il suo movimento è consentito. Lungo le direzioni in cui il movimento risulta libero non è quindi possibile imporre riferimenti di forza. Questo ha portato alla necessità di sviluppare una strategia di controllo che consenta di controllare separatamente le forze e gli spostamenti (o le velocità) nei singoli gradi di libertà del robot. Tale strategia di controllo sviluppata prende il nome di *hybrid control*, controllo ibrido.

Il relativo schema di controllo è riportato in Figura 2.3, dove è visibile la chiusura

2.1 Introduzione e stato dell'arte

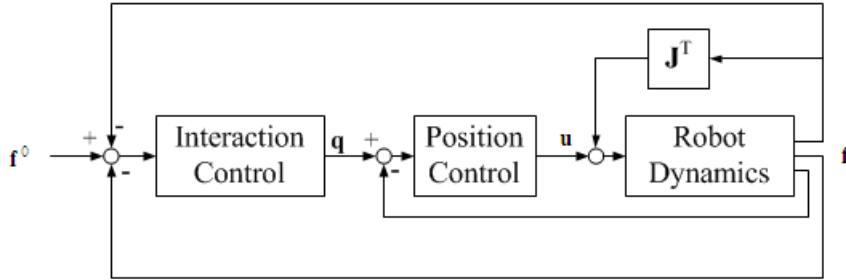


Figura 2.2: controllo in forza implicito

di due anelli di controllo separati, uno di posizione/velocità e uno di forza.

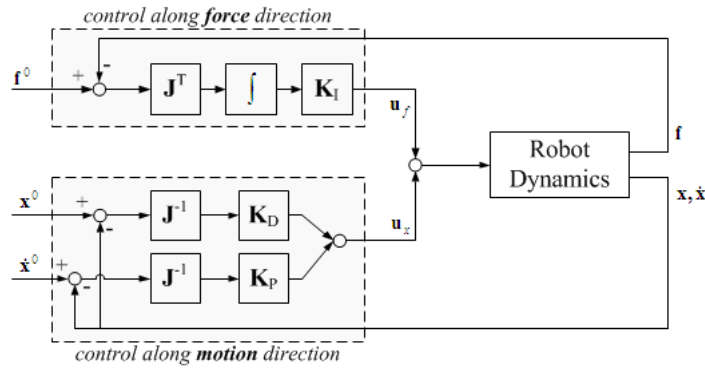


Figura 2.3: controllo ibrido

L'azione di controllo \mathbf{u} è determinata sulla base di due contributi, \mathbf{u}_x e \mathbf{u}_f . Il termine \mathbf{u}_x è caratterizzato da elementi non nulli nelle direzioni in cui viene controllato il movimento, mentre il termine \mathbf{u}_f è caratterizzato da elementi non nulli nelle direzioni in cui viene controllata la forza.

Mentre, in generale, l'azione di controllo \mathbf{u}_x è valutata mediante un controllore di tipo PD, l'azione di controllo \mathbf{u}_f è valutata mediante un controllore di tipo integrale. Questo in quanto tale strategia rende maggiormente stabile l'anello di controllo.

In modo da garantire migliori performance per il sistema di controllo all'equilibrio, è possibile inserire una compensazione *model based* dei termini statici nell'azione di controllo:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_x + \mathbf{u}_f + [\mathbf{J}^T \mathbf{f}_h + \mathbf{g}_{jnt}]$$

Un esempio classico di applicazione del controllo ibrido si ha per applicazioni di tipo *peg in hole* [18] (Figura 2.4).

In questo tipo di task un componente deve essere introdotto nel relativo foro. Il suo moto risulta libero lungo l'asse del foro in cui il componente deve

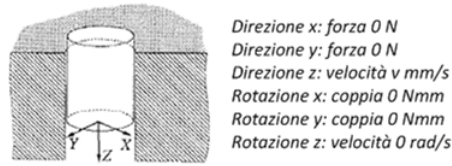


Figura 2.4: esempio di applicazione del controllo ibrido (task di *peg in hole*)

essere inserito, ma risulta vincolato nelle altre direzioni. Per questo motivo, un controllo in forza puro o un controllo in posizione puro non sono consigliabili per questo tipo di operazione. In questo caso, infatti, si necessita di controllare sia la posizione (o la velocità) nella direzione di inserzione e controllare le forze sviluppate nelle altre direzioni, in modo da governare l'interazione instaurata tra il robot e l'ambiente.

I controlli introdotti finora determinano un riferimento di forza e/o posizione sulla base di un feedback di forza, in modo da annullare l'errore.

Tali strategie di controllo non realizzano però un *compliant motion* in quanto il manipolatore non è caratterizzato da cedevolezza controllata, bensì risulta rigido.

L'evoluzione di tali strategie di controllo ha portato a definire schemi di controllo che consentono invece di ottenere un determinato comportamento dinamico del manipolatore, rendendolo cedevole in modo controllato.

Considerando, ad esempio, un'operazione di sbavatura di un componente, nel caso di utilizzo di un controllo in forza il controllore definisce un riferimento di forza che il manipolatore cercherà di inseguire, in funzione delle proprie caratteristiche di rigidità. Se l'ambiente con cui è a contatto risulta molto rigido, come lo può essere un componente meccanico, l'inseguimento del riferimento di forza può causare forze d'interazione elevate, che possono portare all'instabilità. Utilizzando, invece, un controllo che consenta la realizzazione di un *compliant motion*, è possibile determinare per il manipolatore un comportamento dinamico desiderato, che renda il robot cedevole. Questo consente di meglio controllare l'interazione instaurata in quanto, in funzione delle caratteristiche dell'ambiente, si otterrà il comportamento dinamico desiderato, che risulta frutto della sola interazione e non dell'inseguimento di un riferimento.

All'interno di tale famiglia si individuano le seguenti strategie: (1) controllo in impedenza, (2) controllo in ammettenza.

Entrambe le strategie di controllo realizzano una dinamica del robot, ai fini dell'analisi del comportamento controllato, schematizzabile mediante un sistema del secondo ordine del tipo massa-molla-smorzatore.

La differenza che sussiste tra le strategie riportate risulta negli ingressi e nelle uscite del controllore: il controllo in ammettenza ha come ingresso una forza e restituisce in uscita una velocità, mentre il controllo in impedenza ha come ingresso una velocità e restituisce come uscita una forza (Figura 2.5).

Lo schema di controllo associato al controllo in impedenza ([11], [12]) risulta quello riportato in Figura 2.6.

Da tale schema risulta evidente come l'azione di controllo sia determinata in

2.1 Introduzione e stato dell'arte

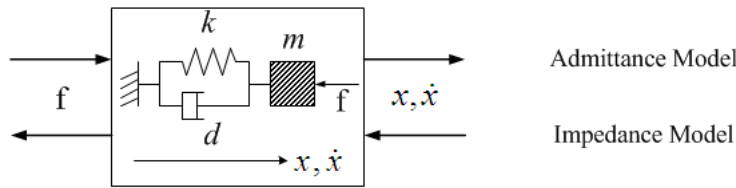


Figura 2.5: comportamento del controllo in ammettenza e del controllo in impedenza

funzione della dinamica inversa del manipolatore ([25]). Questa soluzione consente un disaccoppiamento delle equazioni del sistema controllato, ma si richiede al tempo stesso una corretta stima dei parametri dinamici, non banale.

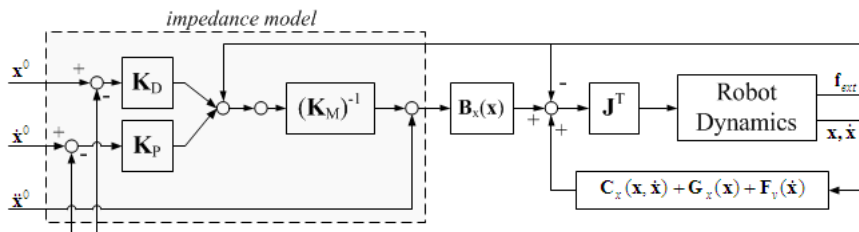


Figura 2.6: controllo in impedenza

Questa tipologia di strategia di controllo risulta caratterizzata da un comportamento dinamico stabile durante l'interazione con un ambiente, anche molto rigido, ma risulta caratterizzata da un'accuratezza di posizionamento limitata se il manipolatore opera nello spazio libero, data la cedevolezza del robot controllato.

Viceversa, il controllo in ammettenza è caratterizzato da elevate accuratze nel caso in cui il manipolatore si trovi a lavorare nello spazio libero, mentre la sua dinamica può risultare instabile nel caso in cui si trovi ad operare a contatto di ambienti rigidi. Questo problema è dovuto alla funzione di trasferimento tra ingressi ad elevata dinamica (forze) e uscite trasformate in riferimenti di velocità attraverso rigidità solitamente elevate, e può essere eliminato utilizzando terminali cedevoli o rendendo elastici i giunti del sistema robotico. Lo svantaggio di tali soluzioni si ripercuotono però in una diminuzione della banda passante in cui il robot può operare e un degrado delle prestazioni.

Sulla base delle strategie di controllo riportate è evidente come il controllo in impedenza risulti preferibile rispetto alle altre strategie nel caso in cui si debba eseguire un task in cui il robot risulta a contatto con l'ambiente e il riferimento dominante del task sia legato al moto del robot (forze generate di conseguenza) e se tale ambiente risulta non (completamente) noto e soggetto a cambiamenti.

La comunità scientifica, negli ultimi anni, ha concentrato la sua attenzione su quelle applicazioni in cui il manipolatore si trova ad interagire con un ambiente o con un operatore le cui caratteristiche, ad esempio di posizionamento nello spazio operativo, possono modificarsi durante l'esecuzione del task stesso. Un esempio di un'operazione di questo tipo può essere un task di assemblaggio in cui il robot coopera con un operatore. In un'applicazione di questo tipo, il sistema robotico è soggetto ad un'interazione con l'ambiente di lavoro in continua trasformazione ed il relativo controllo deve essere in grado di reagire in modo stabile agli input ricevuti.

Risulta importante, quindi, disporre di una piattaforma che consenta la realizzazione di tale operazioni.

Per far fronte a questo tipo di richiesta, sono stati sviluppati manipolatori con caratteristiche differenti rispetto agli attuali robot industriali. Questa nuova generazione di robot è denominata *lightweight robot*. Le caratteristiche principali risultano in una struttura molto più leggera rispetto a quella dei comuni robot industriali, in una sensorizzazione della struttura progettata in modo da consentire l'interazione del robot con l'ambiente.

Una piattaforma innovativa, realizzata dal centro aerospaziale tedesco (DLR), che consente di operare con il robot a contatto con l'ambiente è il Kuka Light-Weight Robot (LWR).

Le peculiarità di tale piattaforma risultano nella sensorizzazione di cui dispone (la struttura è caratterizzata da sensori di coppia ad ogni giunto) che consente la chiusura di un anello interno di coppia. Le strategie di controllo implementate nel LWR sono *model based*, di conseguenza è possibile avere una compensazione dei termini statici (quali i termini gravitazionali) e dei termini di attrito. In particolare, una strategia di controllo implementata nativamente nel LWR è il controllo in impedenza. Questo è implementato sia nello spazio operativo che nello spazio di giunto. In questo modo tale piattaforma risulta particolarmente adatta alla realizzazione di task in cui il robot opera a contatto con l'ambiente.

2.2 LWR Kuka

Il Kuka LightWeight Robot (LWR) ([10], [14]) (Figura 2.7) sviluppato presso l'Istituto di Robotica e Meccatronica del Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) fa parte della nuova generazione di robot leggeri.



Figura 2.7: Kuka LWR c/o CNR-ITIA

Le caratteristiche principali di questa tipologia di robot risultano essere:

- controllo veloce in impedenza al giunto, il quale consente il controllo in interazione;
- smorzamento delle vibrazioni al giunto elastico;
- rilevamento distribuito del contatto lungo l'intera catena cinematica, il quale consente al robot di reagire a forze non solo applicate all'end-effector;
- regolazione di soglie di impatto per garantire i requisiti di sicurezza, lato robot e lato operatori, richiesti.

Il Kuka LWR è stato ideato per la realizzazione di applicazioni profondamente differenti da quelle ottenibili con le precedenti generazioni di robot industriali. Se i robot industriali trovano i loro punti di forza in elevate accuratèzze di posizionamento, elevata velocità di esecuzione del moto, elevata robustezza associata al controllo e relativo basso costo, il LWR consente l'esecuzione di operazioni in ambienti non strutturati, in cui può avvenire l'interazione con operatori.

Allo stato attuale i robot industriali vengono impiegati infatti in ambienti ben strutturati, in cui la posizione delle parti da manipolare e le proprietà che le caratterizzano sono ben note e la possibilità di collisione con l'ambiente stesso e gli operatori sono escluse a priori, prendendo i dovuti accorgimenti. Questo si traduce in prestazioni elevate per operazioni sistematiche che vengono ripetute per un elevato numero di cicli, sempre in modo identico. La necessità di avere elevate accuratezze di posizionamento delle parti si riflette nella elevata rigidità associata a tali robot, il che si traduce in una massa molto importante.

Il LWR trova il suo impiego in tutte quelle applicazioni in cui l'incertezza associata al posizionamento delle diverse parti, e in senso più generale all'intero ambiente di lavoro, non richiede un'elevata accuratezza di posizionamento e in quelle applicazioni in cui il robot deve risultare cedevole rispetto all'ambiente circostante, rendendo indesiderate quelle caratteristiche di elevata massa e rigidità che contraddistinguono i correnti robot industriali: questo viene realizzato introducendo un'elasticità controllata ai giunti. Tipici campi di applicazione non coperti dagli attuali robot industriali, ma fortemente sentiti dalla comunità scientifica, sono ad esempio:

- operazioni di assemblaggio in cui l'accuratezza associata alla stima del posizionamento delle parti e/o l'accuratezza di posizionamento del robot sono significativamente inferiori rispetto alla tolleranza di assemblaggio;
- operazioni in cui il robot lavora in stretto contatto con uno o più operatori, con la possibilità di una diretta e fisica cooperazione;
- applicazioni in cui il robot è montato su di una piattaforma mobile, in cui il posizionamento del robot, dei diversi oggetti nell'ambiente e l'effettiva dimensione di questi ultimi sono caratterizzati da elevate incertezze.

2.3 Architettura di controllo del Kuka LWR

Direttamente collegata alle nuove applicazioni che vengono introdotte dal LWR vi è la progettazione delle relative logiche di controllo. Una forte enfasi viene posta su di esse in quanto vi è la necessità di ottenere un comportamento stabile e robusto del robot data la presenza di errori e incertezze sul relativo modello e di incertezze di posa, e nel contempo, per garantire la sicurezza di operatori e robot durante la cooperazione. Rispetto agli attuali robot industriali i seguenti aspetti sono di particolare rilevanza:

- il controllo di posizione implementato deve compensare gli effetti dell'elasticità intrinseca del robot (quali, ad esempio, vibrazioni) per garantire le performance associate al posizionamento e all'inseguimento di traiettorie, problema che si può presentare anche nei robot industriali che lavorano ad elevate velocità. A tal proposito giocano un ruolo fondamentale i sensori di coppia ai giunti: questi misurano la vibrazione al giunto, consentendo l'implementazione di uno smorzamento attivo di vibrazioni. Considerando l'elasticità che caratterizza la trasmissione, ogni giunto è schematizzabile come un sistema massa-molla-smorzatore: tale sistema risulta del quarto ordine, dove lo stato complessivo è composto da posizione e velocità (come per un qualsiasi sistema del secondo ordine di questo tipo) e da coppia e relativa derivata. Risulta quindi necessaria una misurazione della coppia per l'implementazione di un anello di controllo che si basi sull'intero stato del giunto;
- la coppia misurata ai giunti viene utilizzata per l'implementazione di un anello di controllo, utilizzato anche per il rilevamento di collisioni che possono avvenire lungo l'intera struttura, e più in generale per monitorare e controllare le forze di interazione agenti sul robot.

Da sottolineare è il fatto che i sensori per la misura delle coppie ai giunti sono posizionati in prossimità degli attuatori che consentono il moto dei giunti: questa co-localizzazione di attuatori e sensori è sicuramente vantaggiosa dal punto di vista del controllo.

Le strategie di controllo implementate sono di tipo *passivity based control*, il che è direttamente legato al fatto che il robot si può trovare a lavorare in un ambiente non strutturato, in cui le proprietà degli oggetti da manipolare possono essere non note con precisione. Tutte le strategie di controllo implementate hanno un'intuitiva interpretazione fisica, introducendo concetti quali inerzie virtuali o molle-smorzatori multidimensionali. In questo modo l'energia immessa dal controllore nel sistema è direttamente monitorabile: così facendo è possibile garantire la stabilità del sistema in contatto con un qualsiasi ambiente.

L'architettura di controllo del LWR è totalmente chiusa e inaccessibile ed il modello dinamico su cui le strategie di controllo si basano non è fornito.

Il LWR ha però implementate le seguenti logiche di controllo:

- compensazione di gravità;
- controllo in posizione;
- controllo di impedenza nello spazio dei giunti;
- controllo di impedenza nello spazio operativo.

Tutte queste strategie di controllo sfruttano la misura delle coppie ai giunti per chiudere l'anello di controllo, dove la coppia al giunto può essere interpretata come un'inerzia apparente associata al motore. Inoltre, tali strategie risultano *model based*. Il modello dinamico analitico del robot non è reso disponibile dalla casa produttrice, ma una descrizione di esso è disponibile in letteratura e risulta importante introdurla in quanto necessaria per la descrizione delle strategie di controllo native del Kuka LWR.

2.3.1 Modello dinamico

Il Kuka LWR risulta caratterizzato da giunti elastici ([3]). In modo da introdurre nel modello del robot tale elasticità un giunto, che individua un grado di libertà del sistema, può essere modellato tramite due inerzie b ed m che corrispondono rispettivamente all'attuatore e al link rispettivamente. Tali inerzie vengono interconnesse da un sistema molla-smorzatore caratterizzato da una rigidità k e da uno smorzamento d (Figura 2.8).

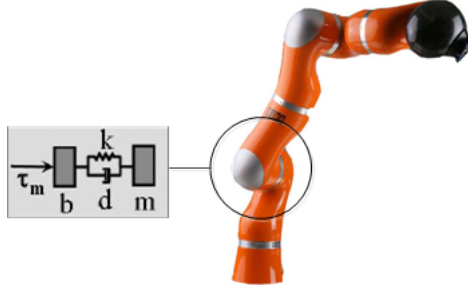


Figura 2.8: modello elastico del giunto del Kuka LWR

In questo modo ogni giunto risulta un sistema del quarto ordine, il cui stato è identificato, ad esempio, dalla posizione e dalla velocità associata all'inerzia lato motore e all'inerzia lato link. Da questo, è possibile definire un modello per l'intero sistema del tipo:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{DK}^{-1}\dot{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau}_{ext} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{B}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{DK}^{-1}\dot{\boldsymbol{\tau}} = \boldsymbol{\tau}_m - \boldsymbol{\tau}_f \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) \quad (2.4)$$

Il vettore \mathbf{q} e il vettore $\boldsymbol{\theta}$ contengono rispettivamente le posizioni lato link e lato motore. La relativa dimensione risulta pari al numero di giunti n presenti nel robot. In particolare, essendo il Kuka LWR caratterizzato da 7 gradi di libertà, n risulta pari a 7.

La prima equazione contiene, nel lato sinistro, l'equazione dinamica di un corpo rigido e risulta del secondo ordine. I relativi termini risultano associati alla matrice di inerzia $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, alla matrice di Coriolis $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ e al vettore gravità $\mathbf{g}(\mathbf{q})$. Rispetto al modello a giunti rigidi, nel lato destro, si ha la coppia associata al sistema molla-smorzatore $\boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{DK}^{-1}\dot{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{K}(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) + \mathbf{K}(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\mathbf{q}})$. La coppia $\boldsymbol{\tau}$ è associata alla rigidità associata al giunto come riportato nella terza equazione. La coppia $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ risulta associata alle azioni esterne agenti sul sistema.

2.3 Architettura di controllo del Kuka LWR

La matrice \mathbf{K} di rigidità al giunto risulta diagonale e definita positiva, la matrice \mathbf{D} di smorzamento al giunto risulta diagonale e semi-definita positiva.

La coppia τ_a è legata alla coppia erogata dal motore τ_m dalla seconda equazione, anch'essa del secondo ordine, dove la matrice \mathbf{B} risulta la matrice di inerzia lato motore. La coppia τ_f è associata ad effetti di attrito al giunto.

Lo stato completo per il sistema descritto risulta caratterizzato dalle posizioni e dalle velocità lato motore e dalle coppie al giunto e dalla relativa derivata. Viene privilegiata la definizione dello stato in questo modo in quanto tutte queste quantità sono direttamente misurabili (posizione motore tramite encoder e coppia al giunto tramite sensore di coppia).

2.3.2 Controllo in coppia

Alla base dello sviluppo delle diverse strategie di controllo implementate nel controllore del Kuka LWR vi è un controllo in coppia ([3]) che retroaziona lo stato lato giunto, costituito dalla coppia τ e la relativa derivata $\dot{\tau}$:

$$\tau_m = -\mathbf{K}_P \bar{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}_D \dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} + \mathbf{K}_T (\mathbf{g}(\mathbf{q}_d) - \boldsymbol{\tau}) - \mathbf{K}_S \dot{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d) \quad (2.5)$$

\mathbf{K}_P , \mathbf{K}_D , \mathbf{K}_T e \mathbf{K}_S sono matrici diagonali definite positive, mentre $\mathbf{g}(\mathbf{q}_d)$ risulta la compensazione di gravità realizzata in funzione della posizione desiderata \mathbf{q}_d . $\bar{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_d$ risulta l'errore di posizione rispetto alla posizione desiderata, così valutato:

$$\boldsymbol{\theta}_d = \mathbf{q}_d + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{q}_d) \quad (2.6)$$

Per l'analisi e la generalizzazione dell'anello di coppia anche in coordinate cartesiane gioca un ruolo importante il fatto di interpretare il feedback di coppia al giunto come un termine associato all'inerzia dei motori. Questo, concettualmente, consente di dividere la progettazione del controllore in due parti, una relativa al feedback di coppia e una relativa al feedback di posizione.

Considerando il feedback di coppia nella forma:

$$\tau_m = \mathbf{B} \mathbf{B}_\theta^{-1} \mathbf{u} + (\mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B}_\theta^{-1}) (\boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \mathbf{K}^{-1} \dot{\boldsymbol{\tau}}) \quad (2.7)$$

\mathbf{u} risulta una variabile di controllo intermedia tra feedback di coppia e feedback di posizione, mentre \mathbf{B}_θ^{-1} è una matrice diagonale definita positiva in cui $b_{\theta,i} < b_i$.

Combinando l'equazione 2.3 con l'equazione 2.7 si ottiene:

$$\mathbf{B}_\theta^{-1} \ddot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \mathbf{K}^{-1} \dot{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{u} \quad (2.8)$$

Confrontando l'equazione 2.3 con l'equazione 2.8 è chiaro che l'effetto del controllo di coppia risulta in una riduzione dell'inerzia motore dal relativo termine \mathbf{B} al termine \mathbf{B}_θ , per il nuovo sottosistema di ingresso \mathbf{u} .

In modo da smorzare effettivamente la dinamica della coppia al giunto, l'equazione 2.7 può essere sostituita con la seguente espressione:

$$\tau_m = \mathbf{B} \mathbf{B}_\theta^{-1} \mathbf{u} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \mathbf{K}^{-1} \dot{\boldsymbol{\tau}} - \mathbf{B} \mathbf{B}_\theta^{-1} (\boldsymbol{\tau} + \mathbf{D}_s \mathbf{K}^{-1} \dot{\boldsymbol{\tau}}) \quad (2.9)$$

dove \mathbf{D}_s è una matrice di guadagni diagonale associata al termine derivativo di coppia. Questo risulta un tipico controllo di tipo PD, scritto in forma tale da

assumere un significato fisico. In questo caso, la nuova dinamica associata al motore è data da:

$$\mathbf{B}_\theta^{-1}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{D}_s\mathbf{K}^{-1}\dot{\boldsymbol{\tau}} = \mathbf{u} \quad (2.10)$$

Importante è sottolineare che i valori ottenuti per il rapporto $\mathbf{B}\mathbf{B}_\theta^{-1}$ per il Kuka LWR risultano compresi tra 4 e 6 per un comportamento cedevole, mentre valori più bassi sono utilizzati quando rigidzze elevate sono richieste al controllo (esempio per il controllo in posizione). Da notare che introducendo il termine $\boldsymbol{\tau}_f$ associato all'attrito lato motore nell'equazione 2.10 risulterebbe ridotto in modo proporzionale a $\mathbf{B}\mathbf{B}_\theta^{-1}$.

In Figura 2.9 è riportato l'anello di controllo in coppia al giunto interno, il cui output viene utilizzato come ingresso per l'anello di controllo più esterno, il quale può rappresentare il controllo in posizione o il controllo in impedenza.

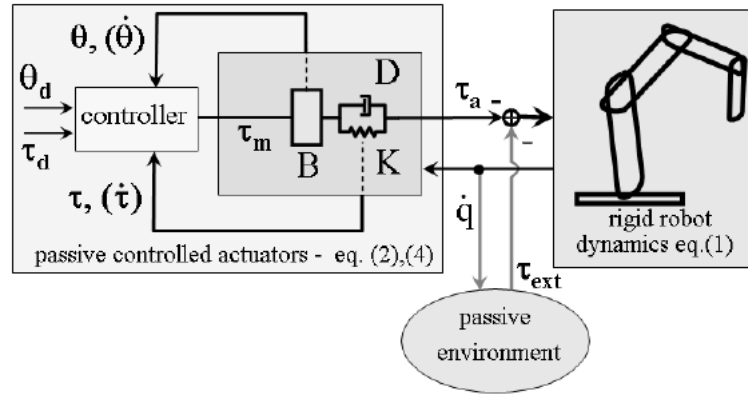


Figura 2.9: LWR: anello di controllo interno di coppia e anello di controllo esterno, tratto da [3]

2.3.3 Controllo in impedenza nello spazio operativo

Per l'anello di controllo al giunto è possibile definire una legge di controllo del tipo:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_\theta\bar{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{D}_\theta\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}_d) \quad (2.11)$$

Tale definizione della legge di controllo, applicata al controllo in impedenza nello spazio operativo ([3]), ha due limitazioni. In primo luogo, è necessario definire gli elementi della matrice \mathbf{K}_θ (o \mathbf{K}_p), assegnando ad essi dei valori minimi per garantire la stabilità asintotica del controllore. Questo è dovuto al fatto che la compensazione di gravità è effettuata in base al valore di posizione desiderata. Il controllo in impedenza nello spazio operativo consente l'impostazione del set di rigidzze, i cui valori possono essere arbitrariamente vicini a zero, rendendo la compensazione di gravità basata su un valore di posizione desiderata che non ha più senso. In secondo luogo, la relazione definita dal controllo in impedenza nello spazio operativo può essere soddisfatta solo localmente da un controllore

2.3 Architettura di controllo del Kuka LWR

definito come nell'equazione 2.11, a causa del contributo dello Jacobiano. Considerando l'equazione di equilibrio per un controllore del tipo 2.11:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) &= \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}_{ext} \\ \mathbf{K}(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_\theta \bar{\boldsymbol{\theta}} &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

sostituendo $\boldsymbol{\theta}$, si ottiene:

$$\boldsymbol{\tau}_{ext} = \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{K}(\mathbf{K} + \mathbf{K}_\theta)^{-1} \mathbf{K}_\theta (\mathbf{q} - \boldsymbol{\theta}_d) \quad (2.12)$$

La matrice di rigidità ottenuta in output risulta:

$$\mathbf{K}_q = \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_{ext}}{\partial \mathbf{q}} = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} + \mathbf{K}(\mathbf{K} + \mathbf{K}_\theta)^{-1} \mathbf{K}_\theta \quad (2.13)$$

la quale risulta funzione della posizione \mathbf{q} .

Risulta possibile definire una legge di controllo che consenta di eliminare tali problemi. In particolare è possibile sviluppare una legge di controllo sulla base di una nuova variabile $\bar{\mathbf{q}}$ che risulta funzione della sola posizione del motore $\boldsymbol{\theta}$, ma che in ogni configurazione statica risulta equivalente alla posizione \mathbf{q} lato link.

In analogia al controllo in impedenza sviluppato per robot rigidi, è possibile determinare una prima legge di controllo del tipo:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{J}(\mathbf{q})^T (\mathbf{K}_x \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}_x \dot{\bar{\mathbf{x}}}(\mathbf{q}) + \mathbf{g}(\mathbf{q})) \quad (2.14)$$

dove $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) - \mathbf{x}_d$.

La variabile \mathbf{x}_d rappresenta la posizione desiderata all'end-effector e $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q})$ è la posa dell'end-effector risolta dalla cinematica diretta. $\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{f}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}$ è lo Jacobiano del manipolatore. Le matrici \mathbf{K}_x e \mathbf{D}_x , definite positive, sono le matrici associate alla rigidità e allo smorzamento desiderato, rispettivamente. La condizione di equilibrio è data dall'equazione:

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\theta}_0 - \mathbf{q}_0) = \mathbf{g}(\mathbf{q}_0) - \mathbf{J}(\mathbf{q}_0)^T \mathbf{F}_{ext} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\theta}_0 - \mathbf{q}_0) + \mathbf{J}(\mathbf{q}_0)^T \mathbf{K}_x \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}_0) = \mathbf{g}(\mathbf{q}_0) \quad (2.16)$$

dove \mathbf{F}_{ext} risulta il vettore contenente le forzanti esterne agenti sul manipolatore.

Se lo Jacobiano $\mathbf{J}(\mathbf{q}_0)$ è una matrice a rango pieno, allora per ogni posizione di equilibrio risulta $\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_x \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}_0)$.

La legge di controllo definita come 2.14 non soddisfa il requisito di comportamento passivo nei confronti di $\dot{\mathbf{q}}$, $-\boldsymbol{\tau}_a$. In modo da garantirne il comportamento passivo si definisce la variabile di controllo \mathbf{u} come una funzione di $\boldsymbol{\theta}$ e $\dot{\boldsymbol{\theta}}$. Il controllore risulta quindi passivo nei confronti di $\dot{\boldsymbol{\theta}}$, $-\mathbf{u}$. L'idea alla base della legge di controllo sviluppata risulta risiedere nel fatto che, sotto determinate condizioni, all'equilibrio vi è una corrispondenza 1:1 tra $\boldsymbol{\theta}_0$ e \mathbf{q}_0 :

$$\boldsymbol{\theta}_0 = \mathbf{h}(\mathbf{q}_0) + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{l}(\mathbf{q}_0) \quad (2.17)$$

dove:

$$\mathbf{l}(\mathbf{q}_0) = \mathbf{J}(\mathbf{q}_0)^T \mathbf{K}_x \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}_0) + \mathbf{g}(\mathbf{q}_0) \quad (2.18)$$

In particolare viene sostituita la posizione al giunto \mathbf{q} nell'equazione 2.14 con il relativo termine statico $\bar{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{h}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$. Si ottiene una legge di controllo che risulta equivalente in condizioni statiche all'equazione 2.14:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{J}(\bar{\mathbf{q}})^T(\mathbf{K}_x\bar{\mathbf{x}}(\bar{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}_x\mathbf{J}(\bar{\mathbf{q}})\dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\bar{\mathbf{q}}) \quad (2.19)$$

$$\bar{\mathbf{x}}(\bar{\mathbf{q}}) = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{q}}) - \mathbf{x}_d \quad (2.20)$$

Finché $\bar{\mathbf{q}}(\boldsymbol{\theta}_0) = \mathbf{q}_0$ tale legge di controllo segue le condizioni di equilibrio dettate dalle equazioni 2.15, 2.16, rimanendo valida la relazione $\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_x\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}_0)$.

La legge di controllo così realizzata è schematizzabile con lo schema a blocchi in Figura 2.10.

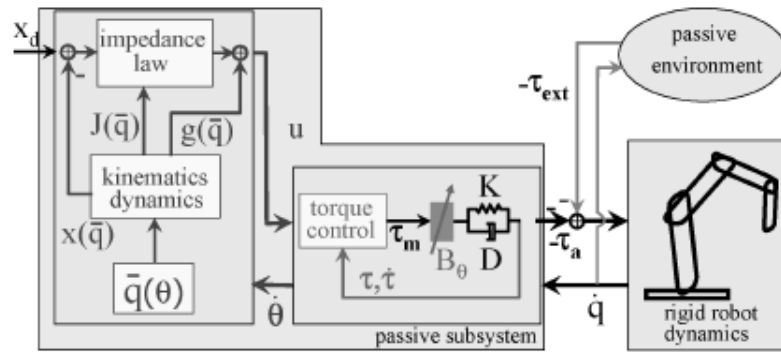


Figura 2.10: LWR: controllo in impedenza nello spazio operativo, tratto da [3]

2.4 Fast Research Interface

La Fast Research Interface (FRI) ([24]) consente la comunicazione tra un pc remoto e il controllore del robot. Grazie alla FRI è possibile inviare comandi al controllore o ricevere strutture dati contenenti informazioni, ad esempio, sullo stato del robot, quali matrice di massa, Jacobiano, posizione del robot nello spazio di lavoro.

Il controllore del robot è equipaggiato con un pannello di controllo (Kuka Control Panel - KCP), che consente all'utente di interagire con il robot. Il KCP consente l'utilizzo di diverse modalità operative che permettono il test delle operazioni programmate e l'esecuzione in sicurezza.

Il controllore dispone di un linguaggio di programmazione (Kuka Robot Language - KRL) che consente di programmare l'esecuzione di un task. Il KCP può quindi essere utilizzato per la visualizzazione, l'esecuzione e la generazione di script KRL (Figura 2.11).

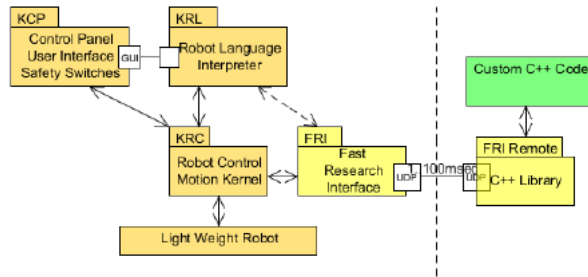


Figura 2.11: architettura del sistema di controllo FRI

Il *motion kernel* del Kuka LWR consente la generazione di traiettorie predefinite utilizzando semplici comandi in linguaggio KRL.

La FRI interagisce direttamente con il *motion kernel*: le traiettorie possono essere inviate al pc remoto, dal quale è possibile modificarle (Figura 2.12).

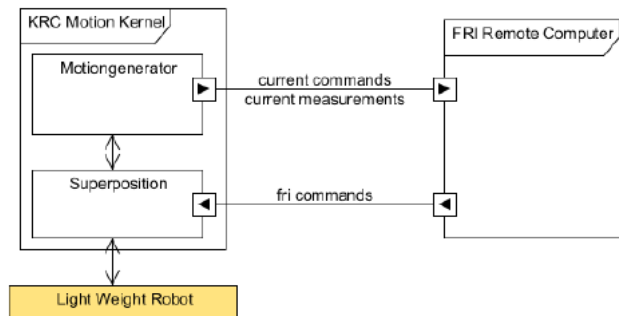


Figura 2.12: interazione tra FRI e *motion kernel*

Inoltre, essendo disponibile nativamente un controllo in impedenza sul Kuka

LWR, è possibile inviare da pc remoto comandi per l'impostazione di parametri di rigidezza, smorzamento e forze/coppie desiderate. Tali comandi sono caratterizzati da funzioni specifiche che consentono una diretta interazione tra il pc remoto e il controllore del robot.

La FRI, oltre alle strutture dati specifiche, mette a disposizione delle variabili generiche, di tipo intero, reali e booleane, che possono essere utilizzate per la lettura o la scrittura di I/O digitali del KRC, per il controllo del tool applicato all'end-effector del robot, per la lettura o l'imposizione di stati interni al programma KRL altrimenti inaccessibili (Figura 2.13).



Figura 2.13: variabili FRI per la comunicazione tra pc remoto e programma KRL

La comunicazione tra il pc remoto e il controllore avviene tramite un protocollo UDP. Per la realizzazione della gran parte delle applicazioni si necessita una comunicazione *real-time* tra il pc remoto e il controllore del robot. Questo rende necessario misurare, oltre al numero di pacchetti di informazioni persi, anche il ritardo nella comunicazione e la variazione ad essa associata. La FRI di conseguenza implementa funzioni per la misura di tali quantità (Figura 2.14).

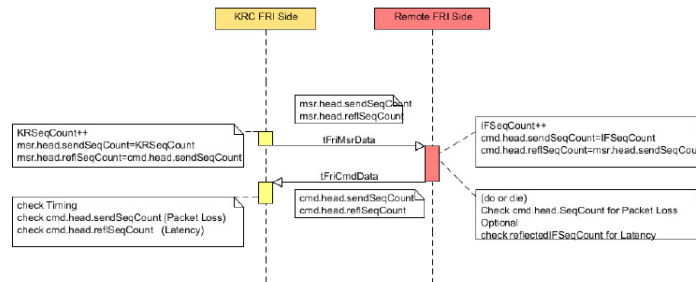


Figura 2.14: FRI: protocollo UDP

La FRI consente di interfacciare il pc remoto al controllore del robot in due modalità operative ed è realizzata come una macchina a stati (Figura 2.15):

- *Monitor mode*: l'intera struttura dati può essere ottenuta lato pc remoto dal controllore ma non gli è consentito inviare comandi al controllore. Di conseguenza, il ciclo di lettura delle variabili non deve essere strettamente *real-time*;

Capitolo 3

Modellazione del controllo di interazione

3.1 Introduzione

Le problematiche riscontrate nell'ambito del *compliant motion control* derivano dall'interazione che si instaura tra il robot e l'ambiente circostante e dal tipo di strategia utilizzata per il controllo del robot. Come introdotto nel paragrafo 2.1, per la realizzazione di applicazioni in cui il robot opera a contatto con l'ambiente è necessario adottare una strategia con retroazione di forza, e più in particolare un controllo in impedenza laddove non sia richiesto un riferimento di forza bensì un determinato tipo di comportamento meccanico. Tale configurazione si verifica molto spesso in presenza di elevata incertezza sulla natura dell'ambiente in interazione e una nozione variamente accurata delle forze e velocità massime esprimibili dal controllo. Nasce quindi la necessità di avere un apparato sensoriale adeguato per la piattaforma utilizzata, che per la maggior parte dei casi prevede l'utilizzo di sensori di forza, in grado quindi di identificare l'entità delle forze di contatto. Tale misura consente la chiusura di anelli di controllo per la realizzazione di applicazioni *sensor based control*.

L'interazione che si instaura tra robot e ambiente è funzione principalmente della rigidità meccanica del robot nella configurazione di contatto, della rigidità/impedenza espressa dal controllo, delle caratteristiche proprie dell'ambiente stesso. In particolare, risultano influenti le proprietà meccaniche dei materiali, approssimabili con parametri di rigidità e di smorzamento, come visibile in Figura 3.1.

In funzione di tali caratteristiche le forze di primo contatto risultano tanto più importanti quanto più si hanno rigidità elevata e smorzamento contenuto. Nella maggior parte delle applicazioni tali caratteristiche non risultano note, di conseguenza risulta difficile la gestione dell'interazione da parte del controllore. Inoltre, anche l'interazione risultante dal moto del sistema robot-ambiente risente delle caratteristiche di rigidità del robot. Più l'ambiente risulta soffice più aumenta la penetrazione del tool del robot in esso. Questo si traduce in un aumento delle forze tangenti alla direzione di movimento, le quali possono produrre effetti indesiderati sulla dinamica del sistema controllato.

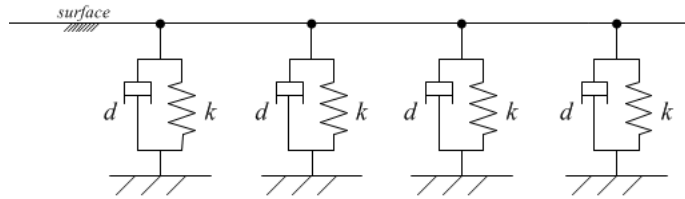


Figura 3.1: schematizzazione dell'ambiente mediante un sistema discreto di molle-smorzatori

Anche la geometria dell'ambiente con cui si entra in contatto influenza l'interazione con il robot. Difetti e irregolarità geometriche modificano localmente la tipologia di contatto che sussiste tra robot e ambiente, introducendo disturbi sulla relativa interazione e lo scambio di forze risultante.

Le problematiche illustrate si ripercuotono di conseguenza sulla stabilità associata al controllo. Le strategie di controllo sviluppate devono quindi consentire un contatto stabile tra robot e ambiente, in condizioni dinamiche in continuo mutamento e parzialmente o totalmente incognite.

Data la crescente diffusione di applicazioni in cui il robot opera a contatto con l'ambiente, sia esso un operatore o un qualsiasi dispositivo, risulta di rilevante importanza lo sviluppo di algoritmi che consentano una configurazione adattativa delle strategie di controllo utilizzate in funzione dell'interazione instaurata, in modo tale da rendere flessibile e stabile l'esecuzione di un generico task di forza al variare delle caratteristiche dell'interazione. Questo significa definire una strategia per la modifica dei parametri di controllo in funzione ad esempio delle forze di contatto scambiate tra robot e ambiente.

In relazione allo schema di controllo utilizzato è possibile quindi operare a livello della definizione dei parametri del controllore sulla base delle grandezze già presenti e utilizzate dal controllo sensor-based.

In particolare, il controllo di impedenza nello spazio operativo consente l'impostazione dei parametri di smorzamento \mathbf{D} e rigidezza \mathbf{K} che caratterizzano il comportamento dinamico del robot e il set-point di posizione \mathbf{x}^0 , come riportato in Figura 3.2, dove il robot e l'ambiente esprimono l'interazione di contatto attraverso una dinamica risultante nelle forze di contatto \mathbf{f}_{ext} e in una velocità $\dot{\mathbf{x}}$.

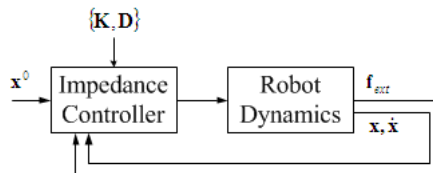


Figura 3.2: controllo in impedenza

3.1 Introduzione

Lo scopo dello sviluppo di un algoritmo che consenta la configurazione del controllo in funzione dell'interazione instaurata riguarda la definizione di tali parametri. Lo schema di controllo risultante vede lo schema di Figura 3.2 inglobato in un unico blocco funzionale, e.g. \mathbf{D} , \mathbf{K} , \mathbf{x}_0 , \mathbf{f}_0 . La relativa uscita \mathbf{f}_{ext} viene retroazionata in anello chiuso e viene utilizzata dal blocco *control strategy* per la definizione dei parametri di controllo, come visibile in figura 3.3.

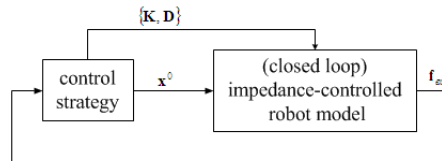


Figura 3.3: schema di controllo globale

Il Kuka LWR dispone nativamente di un controllo in impedenza nello spazio operativo. Tale strategia di controllo consente nativamente di considerare il robot controllato in anello chiuso equivalente ad un sistema massa-molla-smorzatore, come visibile in Figura 3.4 e in Figura 3.5.

Il comportamento in interazione del Kuka LWR è chiaramente disponibile fisicamente in linea, attraverso la lettura delle grandezze dinamiche (via FRI), e.g. forza/coppie al TCP, matrice di massa, posizioni e velocità effettive rispetto alle desiderate (Figura 3.4), mentre non è disponibile a *design time*. Pertanto, si rende necessaria una modellazione del sistema robot-ambiente in condizioni controllate allo scopo di simulare il contatto e sviluppare una strategia adeguata ad essere poi trasferita in linea.

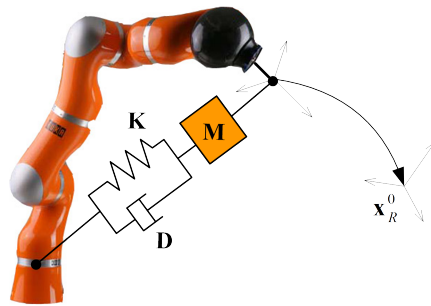


Figura 3.4: LWR: controllo in impedenza nello spazio operativo (sistema equivalente)

Questo significa che un sistema dinamico equivalente può sostituire il robot in un modello semplificato dell'interazione, dove le relative caratteristiche di rigidità e smorzamento sono impostabili da controllo. Ciò è possibile in quanto il controllore *model based* è in grado di compensare termini modellati, quali gravità e attriti, determinando la relativa porzione di coppia $\boldsymbol{\tau}$ da erogare ai

giunti.

Il sistema equivalente realizzato dal controllo in impedenza nello spazio operativo è caratterizzato da sei gradi di libertà, uno per ogni grado di libertà del corpo rigido nello spazio. Il controllo in impedenza nello spazio operativo consente l'impostazione delle sei rigidità \mathbf{K} e dei sei smorzamenti \mathbf{D} associati ai sei gradi di libertà. Inoltre, tale strategia di controllo consente l'impostazione di un set-point di posizione \mathbf{x}_0 , definito attraverso una matrice di trasformazione omogenea, nello spazio di lavoro, di forze e coppie di precarico \mathbf{F}_0 per il mantenimento del contatto lungo le direzioni desiderate e di una matrice per la gestione della ridondanza (Figura 3.5). Idealmente il sistema massa-molla-smorzatore equivalente, caratterizzato dai parametri di rigidità e smorzamento impostati, viene agganciato al set-point. In questo modo il robot verrà richiamato verso il set-point impostato mediante una dinamica definita dal sistema virtuale equivalente. Al cessare delle forze di contatto il robot assume quindi la posizione \mathbf{x}^0 .

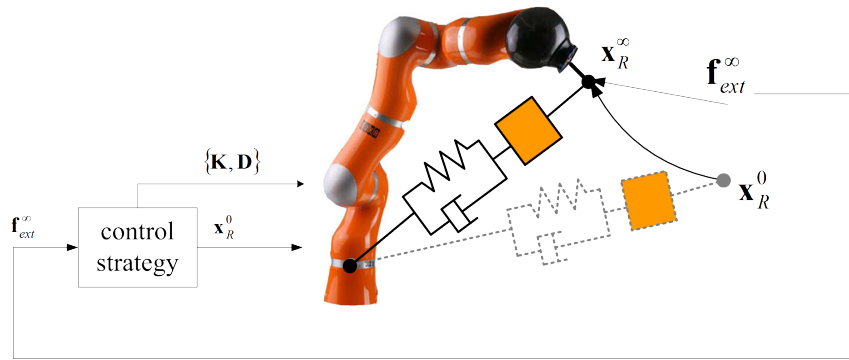


Figura 3.5: schema di controllo globale on-line

A titolo di esempio, una semplificazione del robot può essere rappresentata da un sistema a un grado di libertà del secondo ordine, in cui compaiono quindi i termini associati alla massa M , allo smorzamento D e alla rigidità K del sistema equivalente, come visibile in Figura 3.6. L'ambiente può essere a sua volta rappresentato mediante un sistema a un grado di libertà del primo ordine, in cui compaiono quindi i relativi termini associati allo smorzamento d e alla rigidità k . Tale sistema molla-smorzatore è caratterizzato da una lunghezza indeformata x_E .

Il controllo in impedenza nello spazio operativo consente di definire un set-point di riferimento x_R^0 a cui il sistema robot equivalente viene virtualmente agganciato. In questo modo il sistema equivalente robot viene richiamato verso tale set-point e il suo moto sarà caratterizzato da una dinamica funzione dei parametri impostati nel controllo (D , K) e delle forze scambiate dai due sistemi.

Se il set-point impostato nel controllo risulta in una posizione tale per cui il robot e l'ambiente entrano in contatto, si avrà infatti un'interazione dinamica

3.1 Introduzione

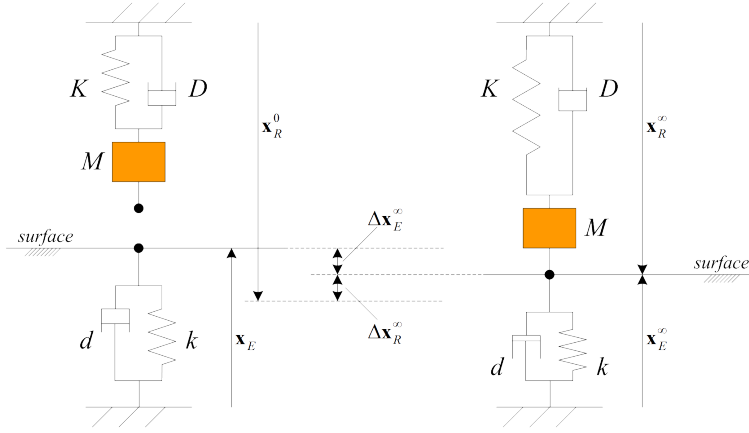


Figura 3.6: schematizzazione dell'interazione robot-ambiente

tra i due sistemi. In funzione dei parametri associati al sistema robot equivalente e dei parametri associati all'ambiente si raggiungerà un equilibrio dinamico, a cui corrisponderà un relativo equilibrio di forze dovuto alle deformazioni residue Δx_R^∞ e Δx_E^∞ . Dall'equilibrio di forze risultante si ottiene una posizione di equilibrio del sistema complessivo (x_R^∞ e x_E^∞).

Le grandezze D , K e x_R^0 sono impostabili da controllo mentre d , k risultano fissate, essendo caratteristiche del sistema passivo, e genericamente non sono note.

Il modello consente quindi di stimare comportamenti risultanti dall'equilibrio di forze con ambienti diversi.

Utilizzando la notazione si ottiene quindi un'equazione per il sistema robot controllato del tipo:

$$M\Delta\ddot{x}_R + D\Delta\dot{x}_R + K\Delta x_R = f_R + f_R^0$$

dove f_R^0 risulta la forza associata ad un eventuale precarico.

Nella trattazione del problema il precarico risulta nullo, di conseguenza viene trascurato il termine f_R^0 . Le relative matrici di massa M , di smorzamento D e di rigidezza K risultano di conseguenza diagonali.

I contatti che si instaurano tra robot e ambiente, durante l'esecuzione di una data operazione, possono essere anch'essi espressi mediante notazione matriciale, in funzione dei sei gradi di libertà nello spazio:

$$d\Delta\dot{x}_E + k\Delta x_E = f_E$$

In funzione della tipologia e della modalità di contatto le matrici ad esso associate di smorzamento e rigidezza saranno caratterizzate da termini non nulli nelle posizioni relative ai gradi di libertà interessati. L'entità dei termini di smorzamento e rigidezza sono funzione della tipologia di ambiente con cui il robot entra in contatto.

Da questo deriva la formulazione matriciale globale, comprendente il sistema equivalente robot e l'ambiente:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_R + \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_R + \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}_R = \mathbf{F}_R \\ \mathbf{d}\Delta\dot{\mathbf{x}}_E + \mathbf{k}\Delta\mathbf{x}_E = \mathbf{f}_E \end{cases}$$

L'espressione generale sopra riportata consente di schematizzare le interazioni che possono instaurarsi tra il robot e un qualsiasi ambiente. In questo modo è possibile modellare qualsiasi sistema e trarre indicazioni relative alle forze di contatto che si sviluppano durante l'esecuzione di un generico task.

Il sistema equivalente risulterà caratterizzato da 6 equazioni disaccoppiate nei relativi gradi di libertà. Tale assunzione è possibile solo nel caso in cui il modello del robot sia stimato accuratamente e il controllo a dinamica inversa esibisca un comportamento nello spazio operativo depurato delle non-linearità. Ciò è dovuto alla modellazione presente nel controllo nativo e quindi alla compensazione dei termini di accoppiamento dinamico tra i vari giunti e della dipendenza non lineare dei termini dinamici, quali le masse e le inerzie, funzioni della configurazione del robot. Tali ipotesi sono da verificare in relazione a:

- la dipendenza dalla configurazione del robot (isotropia), ovvero se il modello disaccoppiato nello spazio operativo sia valido solo localmente o in tutto lo spazio di lavoro;
- il campo di frequenze in cui opera il robot.

Data la natura intrinsecamente non lineare di un manipolatore, l'ipotesi di disaccoppiamento mantiene generalmente validità nella zona di lavoro e a dinamiche contenute, come verrà riscontrato e discusso nei prossimi paragrafi.

Riassumendo, sfruttando il controllo in impedenza nello spazio operativo e la possibilità di definire i relativi parametri di controllo, ovvero rigidzze, smorzamenti e set-point, si è sviluppato un algoritmo per la configurazione adattativa di tali parametri di controllo sulla base delle interazioni che il robot instaura con l'ambiente. Tali interazioni sono stimate attraverso la misura del comportamento dinamico del robot in interazione con l'ambiente. Pertanto, per ottenere un modello dinamico del sistema globale robot-ambiente, necessario alla simulazione fuori linea del comportamento del robot, si è sviluppato un motore in grado di caratterizzare le forze scambiate durante la mutua interazione e verificare la risposta del sistema controllato al variare dei parametri di controllo. Identificata la strategia viene implementata nel blocco *control strategy* che online adatterà la configurazione del controllo in funzione dell'interazione robot-ambiente.

Questo introduce vantaggi per la realizzazione delle applicazioni di forza in quanto:

- è possibile avere un controllo maggiore sull'interazione che si instaura tra robot e ambiente, potendo modulare le forze di contatto durante l'esecuzione del task;
- è possibile lavorare con componenti la cui geometria non risulta completamente determinata. Questo consente di compensare gli errori associati

3.1 Introduzione

a sistemi di misura per la localizzazione o la definizione delle geometrie, come ad esempio i sistemi di visione;

- è possibile modulare i parametri del controllo in modo tale da evitare situazioni in cui la coppia richiesta ai servomotori risulti superiore al valore di allarme, evitando errori di funzionamento del robot e conseguenti arresti d'emergenza.

3.2 Definizione del sistema analizzato

Per la realizzazione di un modello del sistema globale è necessario riferirsi ad un task e ad un ambiente campione.

Un'applicazione che trova notevole riscontro nel campo della robotica industriale risulta quella dell'assemblaggio automatico di componenti.

In letteratura sono altresì storicamente assai frequenti gli studi su questo tipo di task. La trattazione relativa ad un'operazione di questo tipo può essere comunque condotta in via del tutto generale, rimanendo valida per differenti applicazioni.

Il task selezionato risulta quindi relativo ad un'operazione di inserimento.

La geometria selezionata risulta un componente di forma rettangolare caratterizzato da uno spessore di dimensione molto inferiore rispetto alla lunghezza dei relativi lati (Figura 3.7).



Figura 3.7: geometria selezionata e relativa sede

Le dimensioni relative ai lati della sede in cui tale componente verrà assemblato sono maggiorate di 1 mm rispetto alle dimensioni relative ai lati del componente da manipolare.

Il gioco definito per l'operazione di assemblaggio selezionata, pari a 0.5 [mm], risulta compatibile con il gioco associato alle operazioni di assemblaggio che attualmente vengono realizzate in ambito industriale. Di conseguenza il task selezionato, oltre a mantenere una generalità di studio importante per l'estensione dei risultati, consente di confrontarsi con un'operazione realistica.

3.3 Definizione del modello del sistema

La modellazione del sistema globale, che definisce la dinamica dell'interazione tra robot controllato e ambiente, è definibile in forma del tutto generale mediante un'espressione matriciale del tipo:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_R + \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_R + \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}_R = \mathbf{f}_R \\ \sum_i (\mathbf{d}^i \Delta\dot{\mathbf{x}}_E^i + \mathbf{k}^i \Delta\mathbf{x}_E^i) = \mathbf{f}_E \quad \forall i = 1, \dots, N \end{cases}$$

dove N indica il numero di contatti. Al limite, modellando il sistema come continuo $N \rightarrow \infty$. In caso di modellazione di un sistema discreto si ha un numero finito di contatti modellati.

Il termine \mathbf{f}_R ed il termine \mathbf{f}_E^i risultano equivalenti all'equilibrio dinamico. In questo modo è possibile riportare i termini di interazione con l'ambiente nell'equazione del sistema robotico e determinare il moto del manipolatore, ovvero del TCP nello spazio operativo.

Tale espressione consente, in funzione dei gradi di libertà considerati, di analizzare la dinamica dei contatti che si instaurano durante l'esecuzione del relativo task. In funzione delle forze di contatto sviluppate si vuole determinare una strategia che consenta una configurazione on-line dei parametri di controllo.

Un primo modello è stato realizzato nel piano verticale, prendendo di conseguenza in considerazione 3 gradi di libertà, due traslazionali e uno rotazionale.

Un secondo modello è stato realizzato nello spazio, prendendo di conseguenza in considerazione 6 gradi di libertà, tre traslazionali e tre rotazionali.

Entrambi i modelli si rifanno al sistema di equazioni sopra riportato.

Alla base del modello sviluppato per il robot vi sono alcune ipotesi:

- i termini gravitazionali associati al robot sono trascurabili nelle equazioni dinamiche associate in quanto compensati dal controllo stesso;
- la geometria da assemblare viene considerata rigidamente collegata con il robot. I relativi termini di payload, massa e inerzia sono quindi compresi nella massa e nell'inerzia apparente del robot. A livello di implementazione, si modifica il valore associato ai dati del payload nelle impostazioni del robot. In questo modo è possibile inserire la matrice di massa e il tensore di inerzia associato al carico applicato all'estremità del robot;
- la forza di attrito, generata a causa dello scorrimento relativo della geometria trattata sulla superficie della relativa sede, è stata trascurata nella realizzazione del modello a 3 gradi di libertà. Per quanto riguarda, invece, la realizzazione del modello a 6 gradi di libertà è stata modellata utilizzando un coefficiente di attrito dinamico;
- vengono posti limiti di velocità e accelerazione sul movimento del sistema robot-geometria trattata in modo da ricalcare il comportamento del Kuka LWR.

Il modello a 3 gradi di libertà è stato realizzato per una prima analisi semplificata del problema. Tale modello è servito ad analizzare la natura della modellazione dei contatti e verrà utilizzato in seguito per la relativa descrizione delle tipologie di contatto ed interazione con l'ambiente, riscontrabili nel task di riferimento.

Il modello a 6 gradi di libertà è stato realizzato per un'analisi più approfondita dell'interazione robot-ambiente e per la determinazione della strategia di configurazione dei parametri associati al controllo del robot, funzione dell'interazione stessa.

3.3.1 Modellazione del sistema nel piano: 3 gdl

Un primo modello del sistema è stato realizzato nel piano verticale in cui viene eseguito il task di assemblaggio della geometria descritta. I gradi di libertà associati al sistema robot considerati, comprendente la geometria da assemblare in quanto rigidamente collegata ad esso, risultano quindi due traslazioni e una rotazione:

$$\Delta \mathbf{x}_R = [Y, Z, \theta]^T$$

Il sistema in esame, schematizzato nel piano verticale, risulta quello riportato in Figura 3.8.

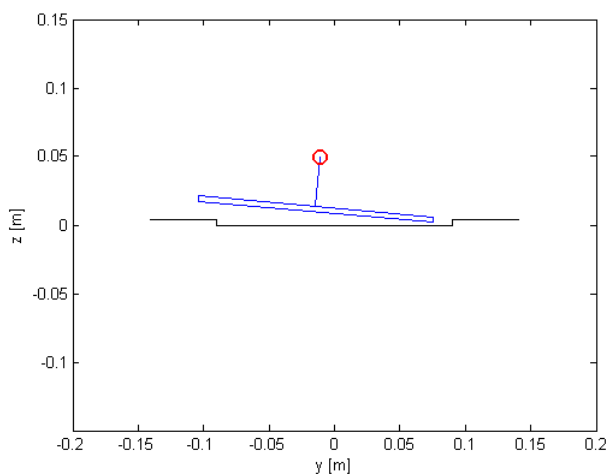


Figura 3.8: schematizzazione della geometria trattata nel piano

In blu è rappresentata la geometria trattata, in nero la relativa sede. Il robot non è visualizzato. La geometria è rigidamente collegata al robot nel punto individuato dal cerchio rosso, punto corrispondente alla flangia del robot.

Il sistema equivalente robot è caratterizzato da un'espressione matriciale del tipo:

$$\begin{bmatrix} m_Y & 0 & 0 \\ 0 & m_Z & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_R + \begin{bmatrix} d_Y & 0 & 0 \\ 0 & d_Z & 0 \\ 0 & 0 & d_J \end{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_R + \begin{bmatrix} k_Y & 0 & 0 \\ 0 & k_Z & 0 \\ 0 & 0 & k_J \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_R = \mathbf{f}_R$$

3.3 Definizione del modello del sistema

I parametri relativi allo smorzamento e alla rigidità associati al sistema equivalente risultano quelli impostati da controllo.

I valori associati ai parametri di massa e inerzia sono stati impostati in base ai risultati ottenuti nel paragrafo 3.3.6. Il controllo, infatti, pur compensando la gravità e gli attriti associata al sistema non può realizzare un sistema privo di massa, in quanto risulterebbe instabile.

Per la caratterizzazione dell'interazione robot-ambiente, che si instaura durante l'esecuzione del task, è necessario modellare i possibili contatti che possono verificarsi.

3.3.2 Interazioni elementari con l'ambiente

Per la descrizione dei contatti modellati si è effettuata una simulazione del comportamento dinamico del robot in interazione con l'ambiente sulla base di una sequenza di operazioni per l'inserzione della geometria trattata predefinita, non ottimizzata e che non prevede una configurazione adattativa dei parametri di controllo. Tale sequenza di operazioni prevede i seguenti passaggi:

- procedura elementare A) posizionamento della geometria trattata al di sopra della relativa sede ed inserzione del primo vertice della geometria trattata. Questo viene effettuato posizionando il set-point del controllo in impedenza nello spazio operativo al di sotto della superficie della sede. In questo modo la geometria trattata trasla in direzione verticale in modo da far avvenire il primo contatto tra geometria e ambiente. Alla rigidità torsionale k_θ è associato un valore elevato in modo che il componente trasli rimanendo rigido nelle rotazioni, non essendo stata modificata la matrice di rotazione associata al set-point;
- procedura elementare B) allineamento tra la geometria trattata e il primo lato della sede. Questo viene effettuato posizionando il set-point del controllo in impedenza nello spazio operativo lungo la direzione orizzontale, in modo che risulti al di fuori della superficie della sede. In questo la geometria trattata trasla in direzione orizzontale in modo da far avvenire il secondo contatto tra geometria e ambiente. Alla rigidità torsionale k_θ è associato un valore elevato in modo che il componente trasli rimanendo rigido nelle rotazioni, non essendo stata modificata la matrice di rotazione associata al set-point;
- procedura elementare C) rotazione della geometria trattata in modo da realizzare l'operazione di assemblaggio. Questo viene effettuato impostando adeguatamente la matrice di rotazione associata al set-point del controllo in impedenza nello spazio operativo. In questo modo avviene il terzo contatto tra il secondo vertice della geometria trattata e la superficie della sede.

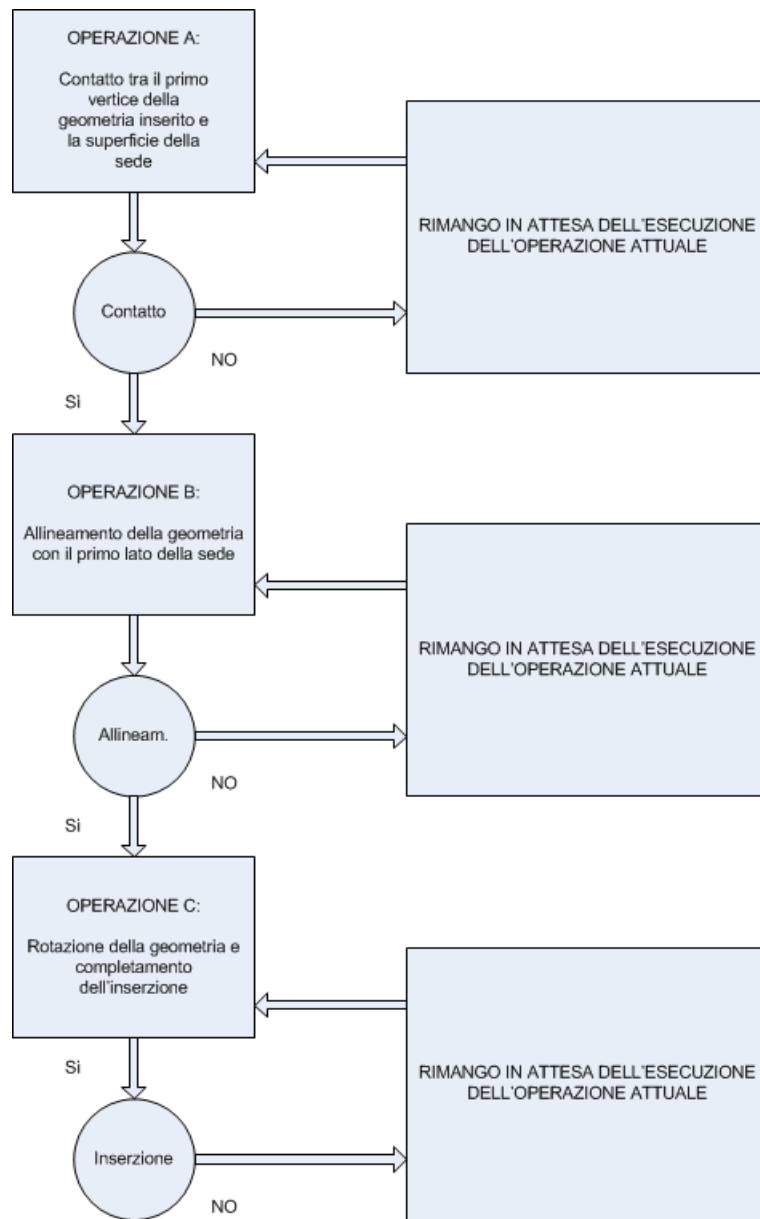


Figura 3.9: schema di realizzazione della simulazione: tale schema sintetizza il flusso di esecuzione delle singole procedure elementari

3.3 Definizione del modello del sistema

I parametri di rigidità e smorzamento associati al controllo, per questa prima strategia predefinita, sono prefissati e risultano, nelle diverse operazioni elementari:

Rigidezze Robot			
procedura elementare	K_Y [N/m]	K_Z [N/m]	K_θ [Nm/rad]
A	1250	1250	100
B	1250	1250	100
C	1250	1250	75

Tabella 3.1: parametri di rigidità impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

smorzamenti adimensionali robot				
procedura elementare	D_Y	D_Z	D_θ	
A	0.5	0.5	0.5	
B	0.5	0.5	0.5	
C	0.5	0.5	0.5	

Tabella 3.2: parametri di smorzamento adimensionale impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

I parametri di rigidità e smorzamento associati all'ambiente risultano:

Parametri ambiente			
k_f [N/m]	d_f [Ns/m]	k_l [N/m]	d_l [Ns/m]
$1 \cdot 10^6$	100	$1 \cdot 10^6$	100

Tabella 3.3: parametri associati all'ambiente per l'esecuzione della simulazione

Per la realizzazione della simulazione del comportamento dinamico del robot in interazione con l'ambiente si sono associati i gradi di libertà del sistema robot-geometria trattata al primo punto immerso nella sede durante l'esecuzione del task. Questo consente una trattazione geometrica del problema più semplice, che troverà maggiore riscontro nella modellazione del problema a 6 gradi di libertà. Inoltre, sfruttando la possibilità di definire arbitrariamente la posizione del tool del robot, a cui si aggancia il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo, questo viene definito nel vertice della geometria trattata che viene immerso per primo. In questo modo l'esecuzione del task risulta più stabile e robusta. Tale definizione del tool, infatti, consente di avere un contatto continuo e stabile, tra il vertice della geometria trattata e il fondo della relativa

sede, durante la prima fase di allineamento e consente di ridurre eventuali sobbalzi dovuti all'inserimento in sede durante la seconda fase di rotazione. Di conseguenza, si riduce la possibilità di fuoriuscita del componente dalla relativa sede, che potrebbe compromettere l'esecuzione del task.

Il sistema di riferimento fisso viene posizionato al centro della sede del componente da assemblare, mentre un secondo sistema di riferimento è posizionato in corrispondenza dell'end-effector del robot e risulta solidale ad esso (Figura 3.10: sono riportati i sistemi di riferimento definiti e la posizione definita per il tool, individuato da un pallino verde). In tale sistema di riferimento vengono riportate le forze e le coppie agenti sul sistema robotico, in quanto, durante l'esecuzione del task, le forze e coppie di interazione vengono stimate dal Kuka LWR all'end-effector. La strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo si basa quindi sulle forze riportate in tale sistema di riferimento. Mediante una scrittura matriciale si ottiene:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{xx}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{xy}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{xz}(\alpha, \beta, \gamma) \\ 0 & 0 & 0 & r_{yx}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{yy}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{yz}(\alpha, \beta, \gamma) \\ 0 & 0 & 0 & r_{zx}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{zy}(\alpha, \beta, \gamma) & r_{zz}(\alpha, \beta, \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ C_X \\ C_Y \\ C_Z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Risulta importante sottolineare che la stima delle forze e delle coppie all'end-effector può essere riportata in un sistema di riferimento orientato in modo arbitrario, purché preventivamente definito, come nell'equazione 3.1. In questo modo è possibile definire il sistema di riferimento all'end-effector in modo che risulti parallelo al sistema di riferimento fisso, posto al centro della sede. Questo consente di trattare componenti di forza all'end-effector nelle direzioni definite dal sistema di riferimento fisso, che coincidono con le direzioni di movimento della geometria all'interno della relativa sede. In questo modo è possibile caratterizzare al meglio l'interazione che si instaura con l'ambiente, avendo come obiettivo la definizione di una strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo. Ciò consente, infatti, di definire le componenti del set-point associato al controllo esattamente lungo le direzioni definite dal sistema di riferimento fisso, permettendo un controllo migliore dell'interazione instaurata.

La prima procedura elementare A prevede l'inserzione del primo vertice del componente, posizionando il set-point del controllo al di sotto della superficie della sede. In questo modo il tool viene richiamato verso il nuovo set-point facendo avvenire il primo contatto. La matrice di rotazione associata al set-point non viene modificata. In questo modo il componente trasla rimanendo rigido nelle rotazioni. Il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo è visibile in Figura 3.11, dove la croce rossa individua la posizione del set-point impostato dal controllo.

Il contatto instaurato è schematizzabile come visibile in Figura 3.12.

3.3 Definizione del modello del sistema

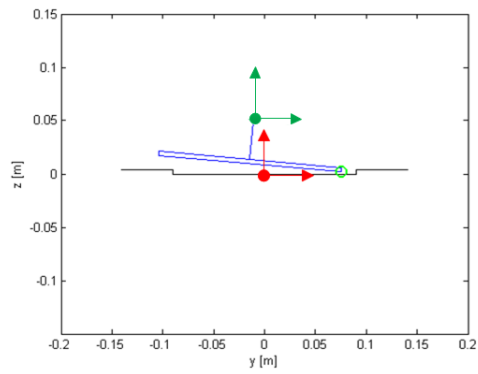


Figura 3.10: definizione del riferimento fisso (in rosso), del riferimento all'effector (in verde) e del tool (cerchio verde)

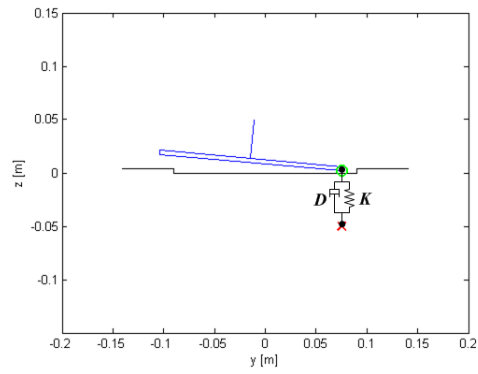


Figura 3.11: procedura elementare A: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo

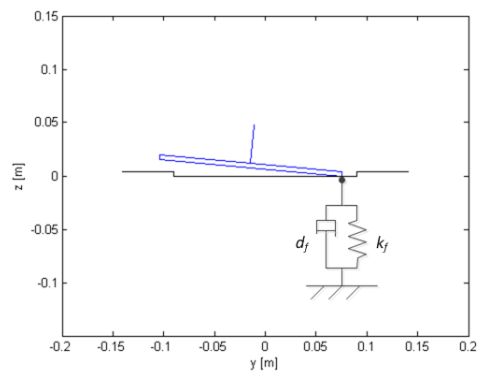


Figura 3.12: procedura elementare A: schema contatto (vedi paragrafo 3.1)

Associate all'ambiente le relative proprietà di rigidità d e smorzamento k e simulando il comportamento dinamico del robot in interazione con il suddetto ambiente, si ricavano gli andamenti per i gradi di libertà del sistema e per le forze e coppie nel sistema di riferimento all'end-effector, riportati in Figura 3.13.

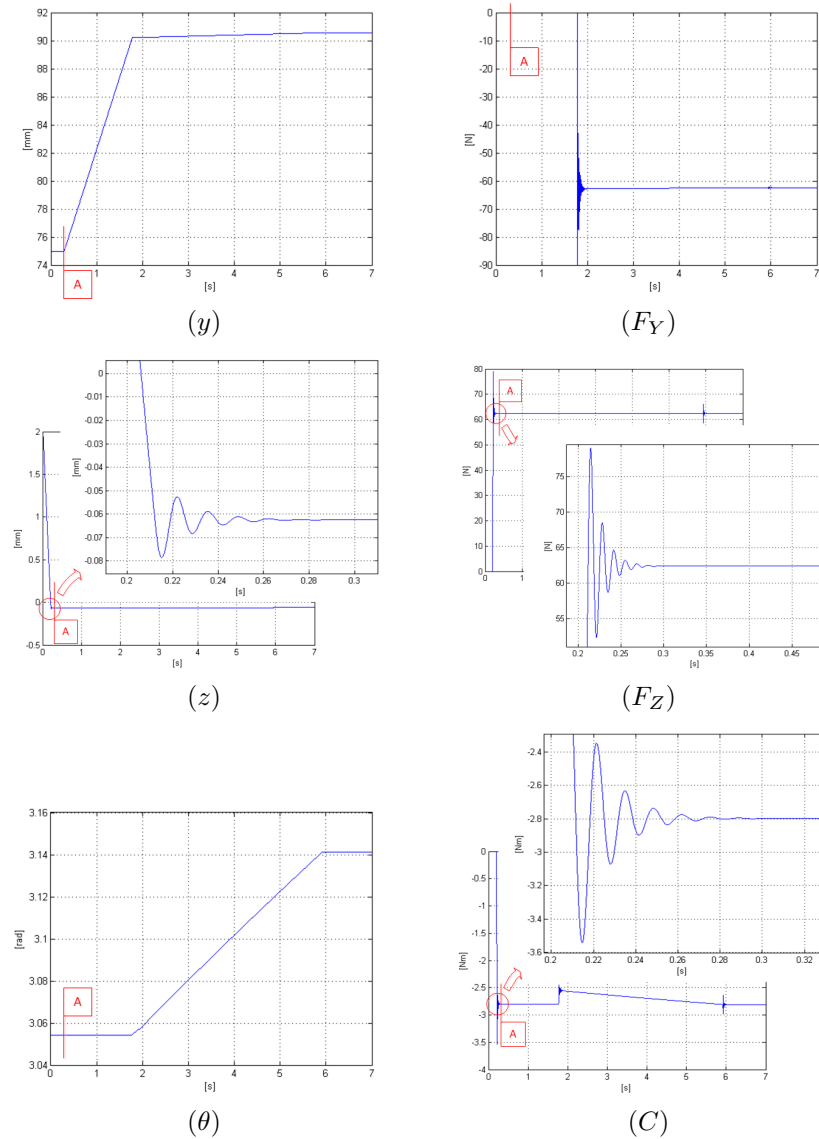


Figura 3.13: procedura elementare A: spostamenti e forze

Dai grafici sopra riportati viene messo in evidenza sul grado di libertà Z, direzione lungo cui avviene il contatto tra la geometria trattata e la superficie della relativa sede, il comportamento caratteristico di un sistema del secondo ordine del tipo massa-molla-smorzatore nei transitori precedenti alla condizione di equilibrio del sistema. Sia la relativa componente di spostamento, che la rela-

3.3 Definizione del modello del sistema

tiva componente di forza sono caratterizzate, infatti, da un andamento oscillante smorzato.

In funzione dei parametri impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo e dei parametri associati all'ambiente si instaura un equilibrio dinamico $\mathbf{f}_R = \mathbf{f}_E$. La forza di reazione al contatto imposta dall'ambiente sul sistema va ad equilibrare dinamicamente l'azione sviluppata dal sistema equivalente molla-smorzatore generata dal controllo in impedenza nello spazio operativo. Il comportamento cedevole del sistema realizzato dal controllo permette il raggiungimento di una condizione di equilibrio. A differenza, infatti, di un controllo puro in forza o puro in posizione lungo la direzione Z il sistema controllato non persiste nell'inseguimento di un dato riferimento, bensì realizza un comportamento dinamico desiderato, il quale, in funzione dell'interazione, determina una posizione di equilibrio e un equilibrio di forze.

L'equilibrio dinamico generato in simulazione è funzione inoltre delle limitazioni su velocità e accelerazione introdotte, in modo da rendere i risultati ottenuti coerenti con il comportamento reale del sistema, e dal passo temporale utilizzato per l'integrazione delle equazioni di moto del sistema. Ad ogni passo di integrazione vengono verificate le velocità e le accelerazioni ottenute e vengono confrontate con i relativi valori massimi impostati. Nel caso in cui i valori assoluti di velocità e accelerazione calcolati risultino superiori alla soglia prefissata vengono saturati, e sulla base dei nuovi valori vengono ricalcolati i relativi spostamenti. Velocità e accelerazioni massime desiderate sono infatti definibili lato controllo per l'esecuzione del task. I parametri utilizzati in simulazione risultano:

Parametri di simulazione		
dt integrazione [s]	v_{max} [m/s]	a_{max} [m/s ²]
0.0002	0.01	5

Tabella 3.4: parametri impostati per l'esecuzione della simulazione del task

Il passo di integrazione temporale utilizzato influenza l'esecuzione della simulazione. Questo in quanto, a parità dei parametri di velocità e accelerazione massimi impostati, un passo di integrazione temporale più ampio si riflette in una variazione di spostamenti maggiori. I vincoli associati all'ambiente sono realizzati in modo tale da imporre una reazione nel momento in cui la geometria schematizzata sconfini nella parte di piano associata all'ambiente modellato. Un passo temporale di integrazione troppo ampio può far sì che la penetrazione della geometria nell'ambiente modellato risulti troppo elevata: questo comporta al passo di integrazione successivo una forza di reazione molto elevata, tanto più elevata quanto più elevata risulta la rigidità associata all'ambiente, che può compromettere l'esecuzione della simulazione o restituire valori di forze e spostamenti che non riflettono il reale comportamento del sistema. D'altra parte, un passo temporale di integrazione troppo piccolo si ripercuote sul tempo di esecuzione della simulazione, che si dilata in modo consistente. Una soluzione di compromesso è stata individuata in modo tale da ottenere buoni risultati dalla

simulazione in tempi accettabili.

La seconda procedura elementare B prevede l'instaurazione del secondo contatto tra il componente e il lato verticale destro della relativa sede. Il set-point del controllo viene spostato in direzione orizzontale e viene portato al di fuori della superficie della sede, in modo da far avvenire il contatto. La matrice di rotazione associata al set-point non viene modificata. In questo modo il componente trasla rimanendo rigido nelle rotazioni.

Il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo è visibile in Figura 3.14.

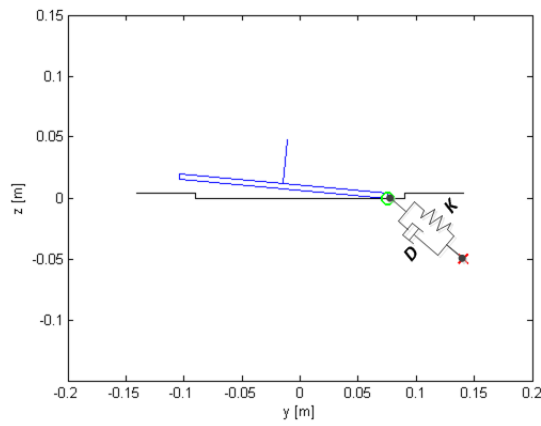


Figura 3.14: procedura elementare B: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo

Grazie al controllo la geometria trattata trasla in direzione orizzontale. Il contatto instaurato è schematizzabile come visibile in Figura 3.15.

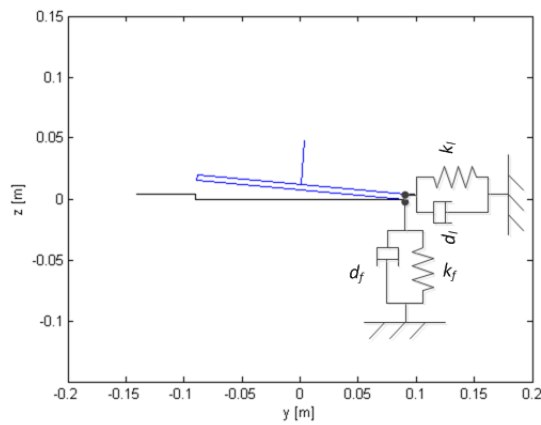


Figura 3.15: procedura elementare B: schema contatto

3.3 Definizione del modello del sistema

La simulazione del comportamento dinamico del sistema globale restituisce gli andamenti dei gradi di libertà del sistema e delle forze e coppie nel sistema di riferimento all'end-effector (Figura 3.16).

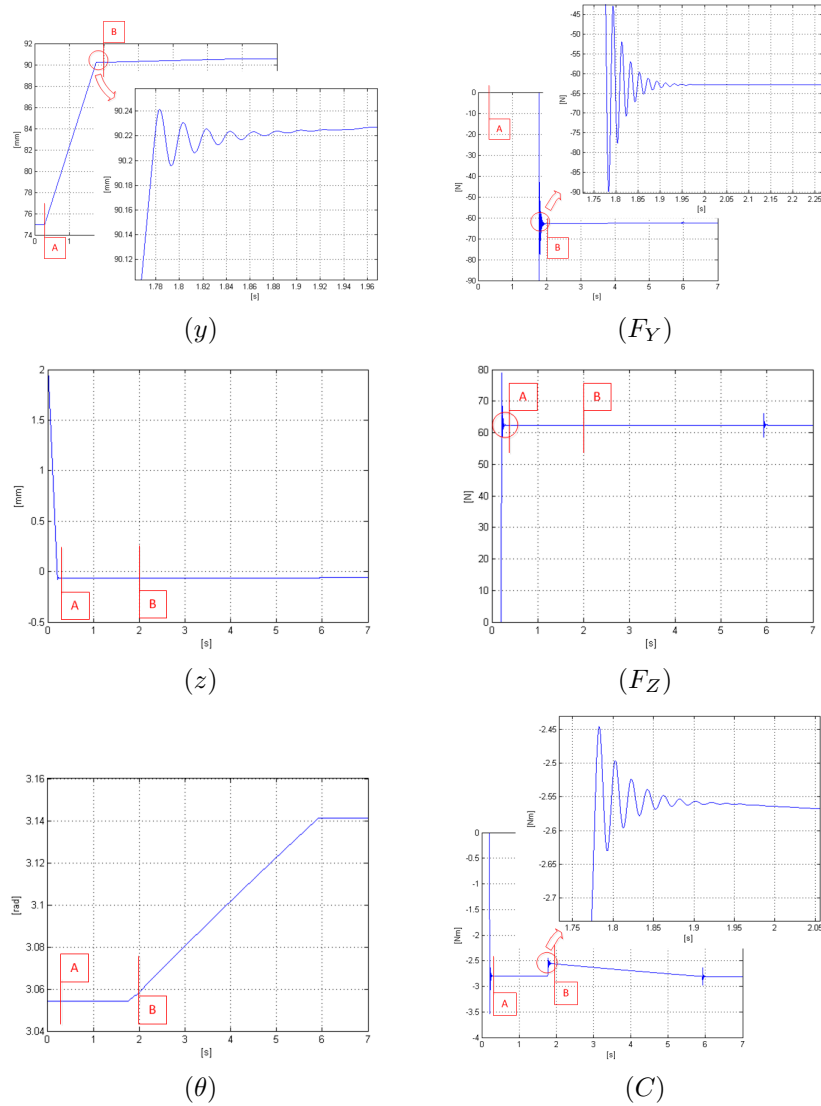


Figura 3.16: operazione B: spostamenti e forze

Quanto descritto per la prima procedura elementare lungo la direzione Z risulta in questo caso valido per la direzione Y. Lungo tale direzione risulta evidente il comportamento di un sistema del secondo ordine nei transitori precedenti alla condizione di equilibrio del sistema, caratterizzato da un comportamento oscillante smorzato sia per quanto riguarda la forza che il relativo spostamento.

La terza procedura elementare C prevede l'instaurazione del terzo contatto tra la geometria trattata e la superficie della relativa sede. Il set-point del controllo rimane nella posizione attuale. La matrice di rotazione associata al set-point viene invece modificata in modo tale da far avvenire la rotazione del componente e la conseguente instaurazione del contatto. Il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo è visibile in Figura 3.3.2.

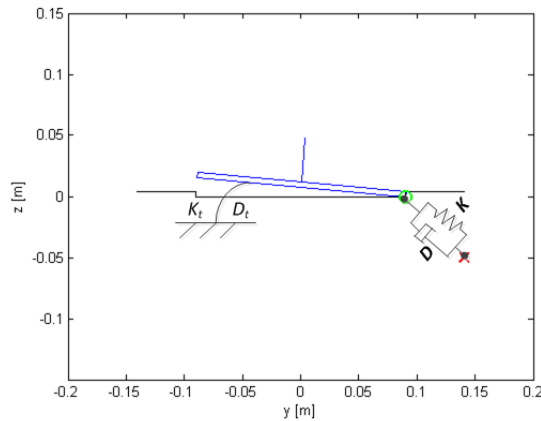


Figura 3.17: procedura elementare C: sistema molla smorzatore realizzato dal controllo

Grazie al controllo la geometria trattata viene inserita nella relativa sede. Il contatto instaurato è schematizzabile come in Figura 3.18.

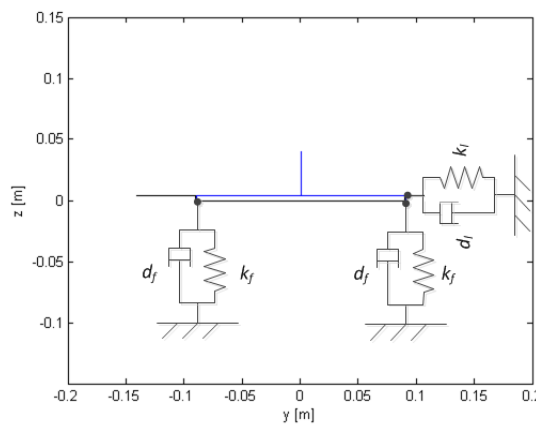


Figura 3.18: procedura elementare C: schema contatto

3.3 Definizione del modello del sistema

La simulazione del comportamento dinamico del sistema globale restituisce gli andamenti dei gradi di libertà del sistema e delle forze e coppie nel sistema di riferimento all'end-effector (Figura 3.19).

La rotazione della geometria trattata e il relativo inserimento nella sede provoca una nuova configurazione dei contatti instaurati, con ripercussioni sull'andamento di forze e spostamenti. Gli andamenti associati ai transitori risultano ancora caratterizzati da un comportamento oscillante smorzato proprio di un sistema del secondo ordine.

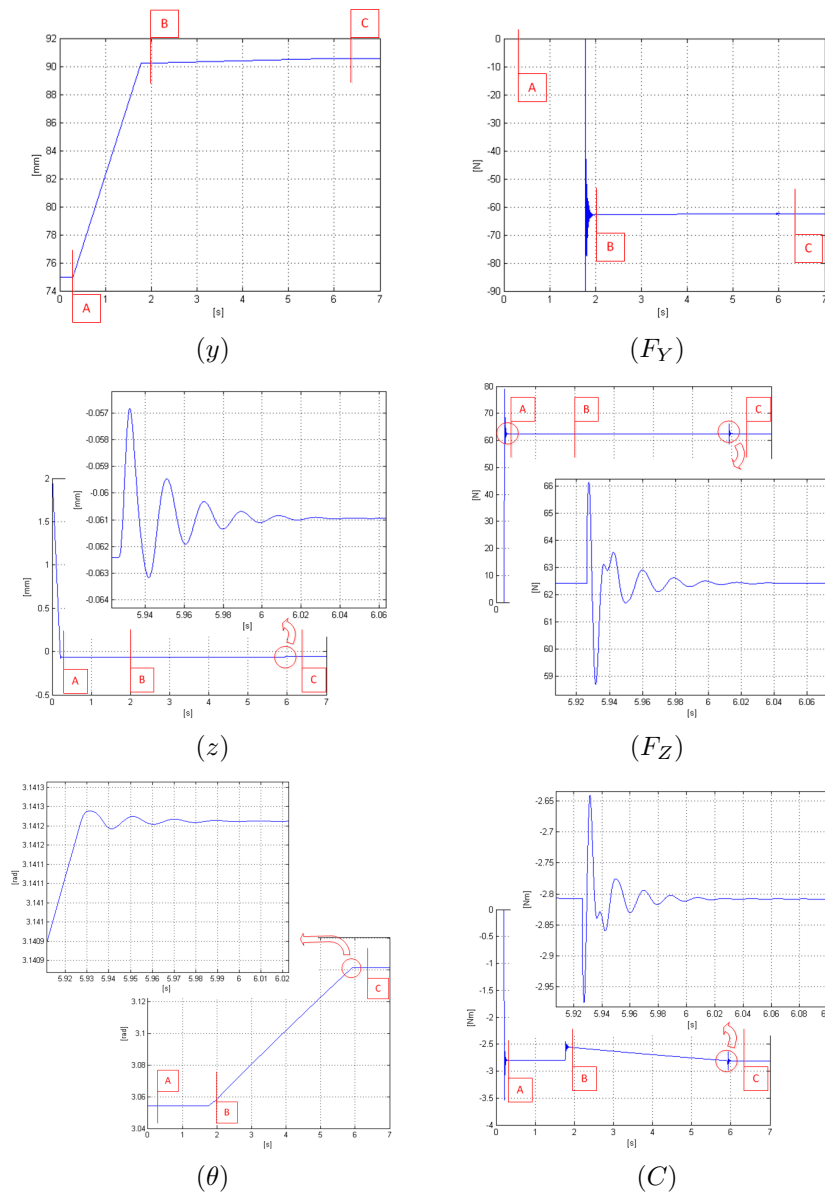


Figura 3.19: posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto

3.3.3 Analisi critica dei risultati ottenuti dal modello a 3 gradi di libertà

La strategia elementare introdotta risulta coerente con quella normalmente seguita da un individuo per l'inserzione di un componente nella relativa sede. Il procedimento consiste, infatti, nell'introdurre l'oggetto e nel ricercare le direzioni libere di movimento, fino ad arrivare ad un allineamento con la sede. Una volta allineato l'oggetto si esegue la rotazione che consente di terminare l'inserimento.

Il set-point del controllo è stato definito nelle diverse procedure elementari in modo arbitrario e predefinito, senza effettuare alcuna considerazione sulle forze sviluppate dall'interazione robot-ambiente. La possibilità di avere un controllo che realizzi un dato comportamento dinamico consente, però, un adattamento del sistema controllato nei confronti dell'ambiente con cui è a contatto, a differenza di un controllo in forza puro.

Tale strategia elementare ha consentito una prima validazione del modello realizzato, consentendo di verificare il comportamento dinamico risultante dalla modellazione dei contatti effettuata. Risulta importante, ai fini di una completa analisi del modello realizzato, verificare i risultati restituiti al variare dei parametri impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo e al variare dei parametri associati all'ambiente.

Una verifica relativa ai parametri impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo si rende necessaria in quanto si deve valutare la dinamica risultante dall'interazione con l'ambiente in diverse configurazioni operative, in modo tale da individuare il comportamento dinamico migliore da impostare, lato controllo, per l'esecuzione del task in esame. Questa verifica consente di valutare la stabilità dei contatti instaurati e l'entità delle forze in gioco. Sulla base dei risultati ottenuti e sulla base di successive prove sperimentali si determinano i parametri da impostare nel controllo in modo tale da ottimizzare l'esecuzione del task.

Una verifica relativa ai parametri associati all'ambiente si rende, invece, necessaria in quanto, nella realtà dell'applicazione in esame, l'ambiente non viene caratterizzato e di conseguenza non risultano note le proprietà ad esso associate. Tale caratterizzazione dell'ambiente non viene effettuata in quanto l'obiettivo della strategia sviluppata è quello di rendere il controllo in impedenza nello spazio operativo adattativo all'interazione sviluppata tra robot e ambiente, in modo del tutto generico, lasciando localmente al robot il compito di adeguare i parametri di controllo. Si rende così necessaria una verifica sulla dinamica sviluppata dal contatto robot-ambiente al variare dei parametri associati all'ambiente stesso, in modo tale da valutare la stabilità dei contatti instaurati e l'entità delle forze in gioco.

3.3 Definizione del modello del sistema

3.3.4 Confronto dei risultati al variare dei parametri di controllo associati al robot

La medesima strategia elementare è stata eseguita utilizzando i seguenti due set di rigidzze di controllo, in modo da confrontare le derivanti azioni dinamiche sviluppate dall'interazione tra il sistema robotico e l'ambiente, lasciando invariati i parametri relativi allo smorzamento:

Configurazioni Rigidzze Robot			
procedura elementare	configurazione 1	configurazione 2	configurazione 3
	$K_Y / K_Z / K_\theta$	$K_Y / K_Z / K_\theta$	$K_Y / K_Z / K_\theta$
A	2000/2000/100	1250/1250/100	500/500/100
B	2000/2000/100	1250/1250/100	500/500/100
C	2000/2000/75	1250/1250/50	500/500/25

Tabella 3.5: rigidzze impostate dal controllo in impedenza nello spazio operativo nelle tre diverse configurazioni

smorzamenti adimensionali robot				
procedura elementare	D_Y	D_Z	D_θ	
A	0.5	0.5	0.5	
B	0.5	0.5	0.5	
C	0.5	0.5	0.5	

Tabella 3.6: smorzamenti adimensionali impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo nelle tre diverse configurazioni

I parametri associati all'ambiente rimangono invariati:

Parametri ambiente			
k_f [N/m]	d_f [Ns/m]	k_l [N/m]	d_l [Ns/m]
$1 \cdot 10^6$	100	$1 \cdot 10^6$	100

Tabella 3.7: parametri associati all'ambiente per l'esecuzione della simulazione

Il controllo realizza un comportamento equivalente del robot controllato che risulta passare da rigido a cedevole nelle tre configurazioni in esame. Questo si ripercuote sulla dinamica risultante dall'interazione con l'ambiente. In particolare a parità delle caratteristiche associate all'ambiente, con un sistema maggiormente rigido si ottengono forze d'interazione più elevate, sia in termini di picco di forze associato al primo contatto, sia in termini di forze all'equilibrio. Questo in quanto, a parità di posizionamento del set-point di controllo, il sistema equivalente molla-smorzatore realizzato dal controllo impone un'azione di richiamo più elevata tanto più i parametri di rigidzza impostati dal controllo risultano

elevati. Conseguentemente, anche la posizione di equilibrio risultante dall'interazione robot-ambiente risulta differente nelle tre configurazioni in esame a causa di una differente penetrazione della geometria trattata nell'ambiente. Tale penetrazione risulta maggiore all'aumentare delle rigidzze impostate dal controllo, in quanto risulta maggiore la relativa azione di richiamo verso il set-point impostato.

I risultati relativi agli andamenti dei gradi di libertà e delle forze riportate all'end-effector sono visibili nelle Figure 3.20.

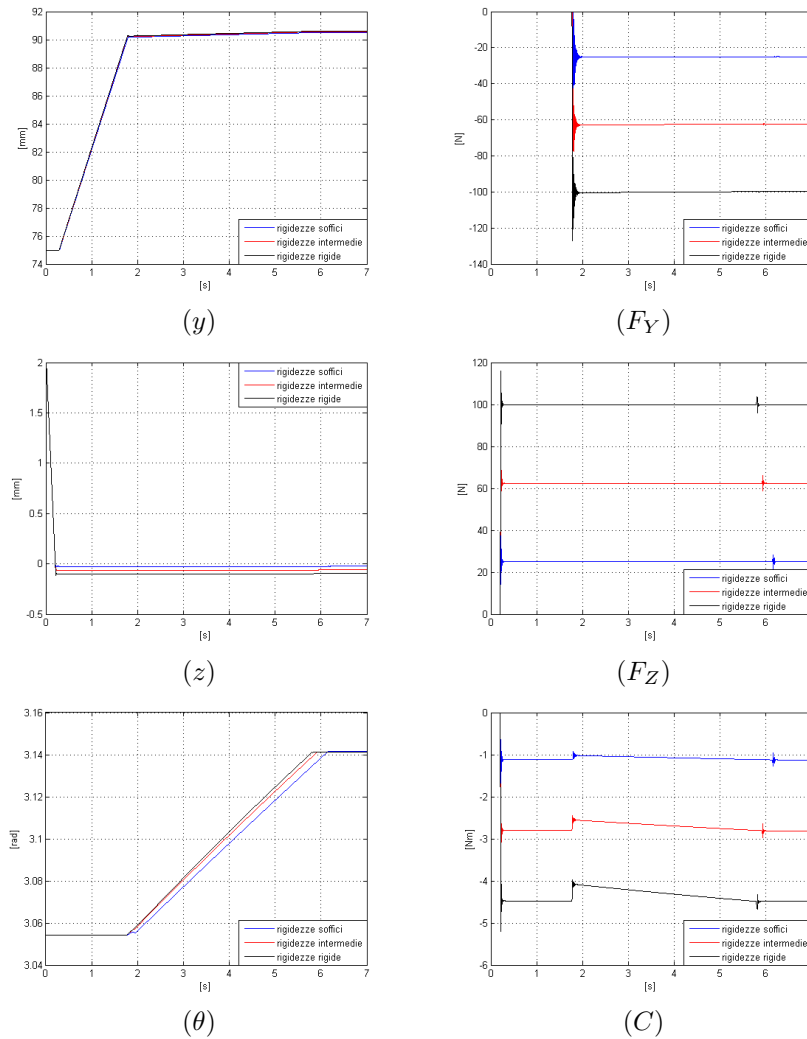


Figura 3.20: posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto

3.3 Definizione del modello del sistema

Tali risultati sono relativi a strategie non ottimizzate: ad esempio non è previsto riportare il pezzo in posizione di riposo all'interno della tasca (imponendo come condizione il raggiungimento di forze e coppie di solgia molto bassa in ogni direzione e scostamenti nulli). In tal modo non viene evidenziato l'energia maggiormente impiegata e dissipata, o il tempo impiegato al raggiungimento dell'equilibrio al variare delle configurazioni imposte. L'impostazione di una condizione comune sarebbe infatti stata relativa ad una particolare scelta della strategia di esecuzione del task. Al contrario, lo scopo dell'analisi di sensitività sulle rigidzze risiede nella valutazione delle entità delle forze scambiate e nei relativi transitori.

3.3.5 Confronto dei risultati al variare dei parametri associati all'ambiente

La medesima strategia elementare è stata eseguita utilizzando il seguente set di rigidzze e smorzamenti per l'ambiente, in modo da confrontare le derivanti azioni dinamiche sviluppate dall'interazione tra il sistema robotico e l'ambiente:

Configurazioni Ambiente			
config. 1	$k_f / d_f / k_l / d_l$	$k_f / d_f / k_l / d_l$	$k_f / d_f / k_l / d_l$
config. 2	$1 \cdot 10^6 / 100 / 1 \cdot 10^6 / 100$	$5 \cdot 10^4 / 1000 / 5 \cdot 10^4 / 1000$	

I parametri associati al controllo risultano:

Rigidzze Robot			
procedura elementare	$K_Y [N/m]$	$K_Z [N/m]$	$K_\theta [Nm/rad]$
A	1250	1250	100
A	1250	1250	100
A	1250	1250	50

Tabella 3.8: parametri di rigidzza impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

smorzamenti adimensionali robot			
procedura elementare	D_Y	D_Z	D_θ
A	0.5	0.5	0.5
B	0.5	0.5	0.5
C	0.5	0.5	0.5

Tabella 3.9: parametri di smorzamento adimensionale impostati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

In particolare, le rigidzze associate all'ambiente vengono rese soffici e vengono aumentati gli smorzamenti. Questo fa sì che la penetrazione della geometria nell'ambiente modellato risulti maggiore rispetto al caso precedente, arrivando all'equilibrio statico con oscillazioni minori su forze e spostamenti. Le forze di equilibrio, a parità dei parametri impostati dal controllo, risultano inferiori in quanto la posizione di equilibrio risulterà più vicina al set-point di controllo a causa della maggior cedevolezza dell'ambiente. La maggior cedevolezza dell'ambiente e il maggior smorzamento ad esso associato si ripercuotono inoltre sui picchi di forza che si generano al primo contatto, con una conseguente riduzione del modulo.

I risultati relativi agli andamenti dei gradi di libertà e delle forze riportate all'end-effector sono visibili nelle Figure 3.21.

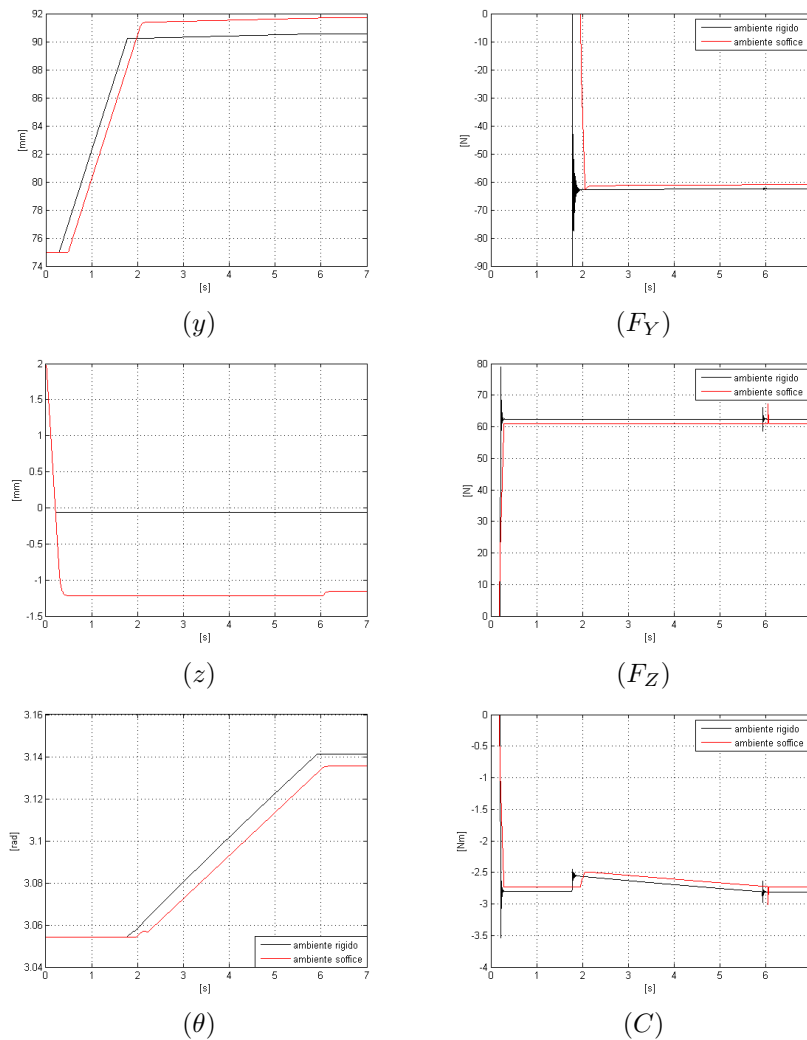


Figura 3.21: posizioni e forze ottenute dall'instaurazione del terzo contatto

3.3 Definizione del modello del sistema

3.3.6 Verifica sperimentale dei parametri del modello

Una verifica sperimentale del comportamento dinamico del robot controllato con controllo in impedenza nello spazio operativo si rende necessaria allo scopo di utilizzare un modello equivalente meccanico del robot controllato all'interno del sistema robot-ambiente.

Le verifiche da eseguire riguardano:

- le rigidzze effettivamente realizzate dal controllo: tali parametri vengono verificati mediante una prova statica in cui viene valutata la deformazione del sistema controllato soggetto a carichi noti;
- gli smorzamenti effettivamente realizzati dal controllo: tali parametri vengono verificati mediante una prova dinamica in cui vengono analizzate le oscillazioni libere del sistema controllato;
- la frequenza propria e la massa associata al sistema controllato.

Tali prove, data la ipotesi di validità del modello localmente nelle configurazioni di lavoro del manipolatore, sono da effettuare in configurazione prossima a quella del task in esame. Inoltre, lo stesso tipo di esperimenti (deformazione statica, decay e sweep) sono stati effettuati anche in una configurazione (Figura 3.22) a rigidzza meccanica molto più elevata.



Figura 3.22: verifica parametri di rigidzza realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

Rigidezza realizzata dal controllo

Le prove svolte per la verifica dei parametri di rigidezza effettivamente realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo sono di tipo statico. Il robot viene portato in una configurazione tale per cui possa essere applicato un carico noto all'end-effector lungo un asse noto. In particolare, l'asse lungo cui viene applicato il carico risulta l'asse verticale definito dalla base del robot (vedi Figura 3.22).

Il set-up realizzato per lo svolgimento della suddetta prova prevede l'impostazione dei seguenti parametri associati al controllo in impedenza nello spazio operativo:

Rigidezze	
K_X [N/m]	3000
K_Y [N/m]	3000
K_Z [N/m]	1000
K_α [Nm/rad]	300
K_β [Nm/rad]	300
K_γ [Nm/rad]	300

Tabella 3.10: parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di rigidezza realizzati dal controllo

Smorzamenti	
D_X	1
D_Y	1
D_Z	0.1
D_α	1
D_β	1
D_γ	1

Tabella 3.11: parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di rigidezza realizzati dal controllo

In questo modo il controllo in impedenza nello spazio operativo realizza un comportamento dinamico equivalente del robot che risulta soffice lungo la direzione Z e molto rigido nelle altre direzioni e nelle rotazioni.

Definito il set-point del controllo in impedenza nello spazio operativo nella posizione attuale dell'end-effector del robot e applicando il carico, il sistema equivalente massa-molla-smorzatore, grazie ai parametri di controllo impostati e alla configurazione in cui il robot si trova a lavorare, subirà una deformazione lungo la sola direzione di interesse Z. Il sistema si porterà in una nuova configurazione di equilibrio, da cui risulterà una nuova posizione dell'end-effector. Tale posizione

3.3 Definizione del modello del sistema

di equilibrio è funzione del carico applicato e della rigidità K_Z realizzata dal controllo. Misurando la nuova posizione di equilibrio e conoscendo la posizione comandata dal controllo è possibile ricavare la deformazione del sistema equivalente lungo la direzione Z. In questo modo, risulta semplice verificare l'effettiva rigidità realizzata dal controllo nella direzione Z mediante la relazione:

$$K_Z = \frac{F}{s_d}$$

dove F è la forza statica esercitata dal carico e s_d è la deformazione ottenuta.

La campagna di prove è stata realizzata utilizzando tre valori di carico:

Entità del carico	
P_1 [N]	37
P_2 [N]	45
P_3 [N]	65

Tabella 3.12: carichi applicati all'end-effector del robot per l'esecuzione delle prove per la verifica dei parametri di rigidità realizzati dal controllo

La realizzazione della prova è stata condotta interfacciando un pc remoto (con patch real-time Xenomai del S.O. GNU/Linux) con il controllore del robot. Un canale di comunicazione tra il pc remoto e il controllore del robot è stato aperto tramite FRI, impostando una frequenza di aggiornamento pari a 200 Hz. Dal pc remoto è possibile sovrimporre i parametri di controllo di impedenza, e.g. set-point, \mathbf{K} , \mathbf{D} , e precarico \mathbf{F}_0 , in modo tale che il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo imponga la posizione di equilibrio e la forzante statica, popolando la struttura dati relativa CartCmdPos (vedi paragrafo 2.4). Attraverso il medesimo canale vengono rilevate anche le misure sullo stato cinematico e dinamico del robot, e.g. la matrice di trasformazione omogenea, il vettore contenente le forze e le coppie stimate all'end-effector, e all'effettivo istante di tempo in cui tale operazione di aggiornamento e lettura dati avviene. Tali informazioni vengono passate popolando le strutture dati CartMsrPos (misura della posizione), tcpFTest (forze stimate all'end-effector) (Figura 3.23).

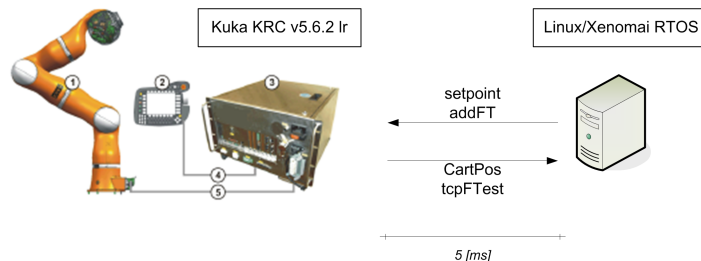


Figura 3.23: schema di comunicazione tra pc remoto e FRI

L'applicazione di tali carichi ha prodotto le deformazioni del sistema lungo la direzione Z riportate in Figura 3.24, 3.25, 3.26.

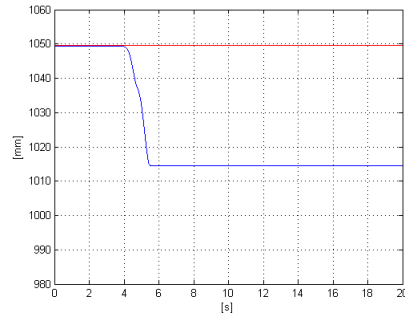


Figura 3.24: carico 37 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z

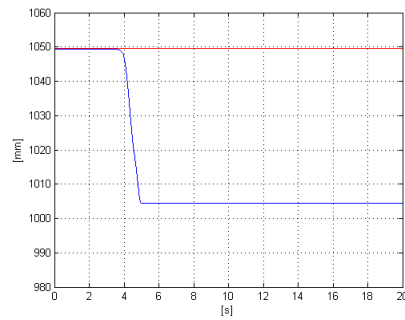


Figura 3.25: carico 45 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z

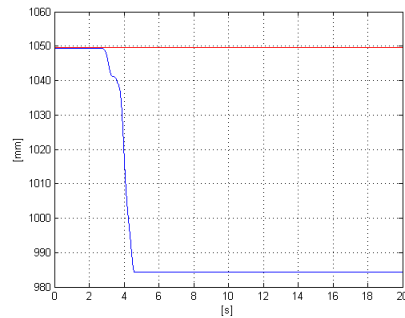


Figura 3.26: carico 65 N, spostamento comandato (rosso) e spostamento misurato (blu) lungo Z

3.3 Definizione del modello del sistema

Da tali andamenti si determina la relativa deformazione e la relativa rigidezza realizzata dal controllo:

rigidezza realizzata dal controllo		
carico $[N]$	deformazione $[mm]$	rigidezza $[N/m]$
37	35	1057
45	46	978
65	66	984

Tabella 3.13: rigidzze ricavate dallo svolgimento della campagna di prove

In particolare si evince che il controllo realizza correttamente le rigidzze impostate nel piano cartesiano, con errori di pochi punti percentuali, risultando affidabile.

Smorzamento realizzato dal controllo

Le prove svolte per la verifica dei parametri di smorzamento effettivamente realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo sono di tipo dinamico. Il robot viene portato in una configurazione tale per cui possa oscillare liberamente lungo la direzione verticale Z (vedi Figura 3.27).



Figura 3.27: verifica parametri di smorzamento realizzati dal controllo in impedenza nello spazio operativo

Definito, sulla base di tale configurazione, il set-point associato al controllo in impedenza nello spazio operativo, l'end-effector del robot viene spostato manualmente lungo la direzione Z, per poi essere rilasciato. Il sistema molla-smorzatore realizzato dal controllo produce un'azione di richiamo sull'end-effector verso il set-point definito, realizzando una dinamica del sistema che risulta funzione dei parametri di controllo impostati. Dall'analisi dello spostamento lungo la direzione Z è possibile, quindi, ottenere lo smorzamento adimensionale del sistema controllato analizzando il decremento logaritmico.

Il set-up realizzato per lo svolgimento della suddetta prova prevede l'impostazione dei seguenti parametri associati al controllo in impedenza nello spazio operativo:

Rigidezze			
	set-up 1	set-up 2	set-up 3
K_X [N/m]	3000	3000	3000
K_Y [N/m]	3000	3000	3000
K_Z [N/m]	1000	2500	2500
K_α [Nm/rad]	300	300	300
K_β [Nm/rad]	300	300	300
K_γ [Nm/rad]	300	300	300

Tabella 3.14: parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di smorzamento realizzati dal controllo

Smorzamenti			
	set-up 1	set-up 2	set-up 3
D_X	1	1	1
D_Y	1	1	1
D_Z	0.1	0.1	0.7
D_α	1	1	1
D_β	1	1	1
D_γ	1	1	1

Tabella 3.15: parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove realizzate per la verifica dei parametri di smorzamento realizzati dal controllo

In questo modo il controllo in impedenza nello spazio operativo realizza un comportamento dinamico equivalente del robot che risulta soffice lungo la direzione Z e molto rigido nelle altre direzioni e nelle rotazioni.

L'end-effector viene prima portato in una condizione iniziale differente rispetto a quella di equilibrio, che coincide con il posizionamento dell'end-effector nel set-point di controllo, e viene poi rilasciato.

3.3 Definizione del modello del sistema

Gli spostamenti misurati lungo la direzione Z assumono gli andamenti riportati in Figura 3.28, 3.29, 3.30.

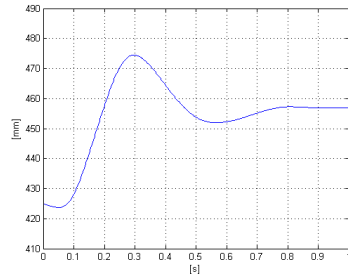


Figura 3.28: spostamento in Z (K_Z 1000 [N/m], D_Z 0.1 [Ns/m])

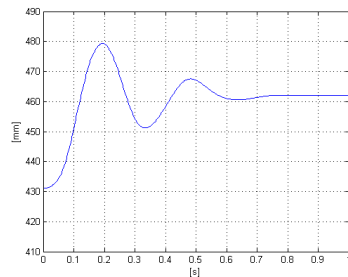


Figura 3.29: spostamento in Z (K_Z 2500 [N/m], D_Z 0.1 [Ns/m])

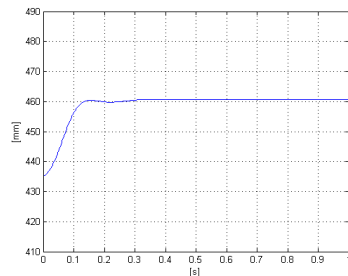


Figura 3.30: spostamento in Z (K_Z 2500 [N/m], D_Z 0.7 [Ns/m])

Gli andamenti riportati evidenziano come il parametro associato allo smorzamento e alla rigidezza nella direzione Z considerata influenzino la dinamica del sistema controllato. In particolare, è evidente che all'aumentare dello smorzamento le oscillazioni del sistema diminuiscono in entità e numero prima del raggiungimento della condizione di equilibrio. Viceversa, all'aumentare della rigidezza le oscillazioni aumentano in entità e numero prima del raggiungimento della condizione di equilibrio.

Per ognuna delle tre configurazioni dei parametri di controllo sono state effettuate diverse ripetizioni di tale prova.

Analizzando il decremento logaritmico è stato possibile ricavare lo smorzamento adimensionale h associato al sistema equivalente massa-molla-smorzatore realizzato dal controllo in direzione z :

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{n} \ln \frac{u_1}{u_2}$$

dove n indica il numero di cicli considerati, u_1 la semi-ampiezza del primo ciclo e u_2 la semi-ampiezza del secondo ciclo (vedi Figura 3.31).

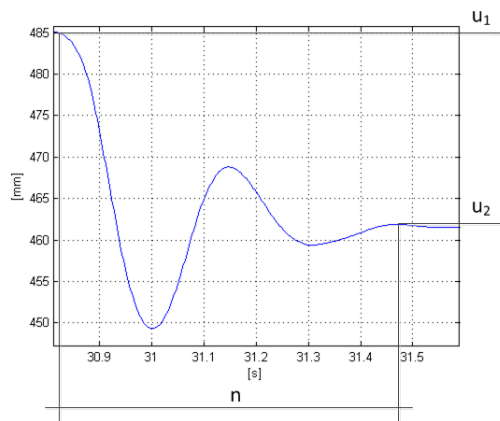


Figura 3.31: decremento logaritmico

I risultati ottenuti sono stati mediati sul numero di prove effettuate per ogni singolo set-up, da cui si ricava:

smorzamento adimensionale	
set-up	smorzamento adimensionale
1	0.1404
2	0.1212
3	0.7317

Tabella 3.16: smorzamento adimensionale ricavato dallo svolgimento della campagna di prove per i diversi set-up definiti

In particolare si evince che il controllo realizza correttamente gli smorzamenti adimensionali impostati nel piano cartesiano, con errori di pochi punti percentuali, risultando affidabile.

3.3 Definizione del modello del sistema

Frequenza propria

L'identificazione della frequenza naturale del sistema per ogni grado di libertà è stata effettuata imponendo al robot un riferimento di forza, attraverso il campo di precarico imposto al controllo di impedenza (valore passato via FRI lungo la direzione definita dal grado di libertà nello spazio in esame), di tipo sweep sinusoidale tra le frequenze 0 - 10 Hz e di semi-ampiezza pari a 20 N. Lo sweep viene effettuato lineare con un tasso di variazione di frequenza pari a 0.1 [Hz/s]. Il range di frequenze identificato e la semi-ampiezza utilizzata risultano sufficienti per l'instaurazione della prima risonanza del sistema controllato, consentendo di misurare un'uscita del sistema sufficientemente elevata rispetto al rumore elettrico. Inoltre tali valori non rischiano di sollecitare il sistema in modo critico. Per lo svolgimento della prova il robot è stato portato nella configurazione visibile in Figura 3.32, configurazione in cui il robot si troverà ad operare nell'esecuzione del task in esame. Dalla sperimentazione, infatti, è emerso che la frequenza propria associata alla struttura è funzione della configurazione del robot. Questo è imputabile al fatto che al variare (aumentare) della frequenza l'accoppiamento dinamico tra i giunti assume importanza e intensità rilevanti, modificando in tal modo la risposta del sistema. La configurazione del robot modifica intrinsecamente, infatti, la rigidità meccanica del robot, vedi ellissoidi di rigidità ([25]).



Figura 3.32: verifica frequenza naturale realizzata dal controllo in impedenza nello spazio operativo

Allo scopo di rilevare la risposta in frequenza del sistema ad uno sweep di forza, i parametri di rigidità sono impostati ai valori prossimi ai massimali, in modo da ottenere il maggiore effetto di risposta elastica possibile. Parimenti, lo smorzamento è mantenuto molto contenuto in modo da non introdurre effetti di attenuazione o ritardo. A parità di parametri, le prove di identificazione prevedono una eccitazione mono-assiale lungo gli assi di traslazione X, Y e Z

rispettivamente. Lo studio dell'accoppiamento del sistema rileva pertanto la risposta sia lungo la direzione di eccitazione, sia lungo le direzioni ortogonali. L'identificazione è partita dalla direzione verticale definita dal grado di libertà Z, direzione che vede la prevalenza dei contatti sviluppati dall'interazione robot-ambiente.

Il set-up realizzato per lo svolgimento della suddetta prova prevede l'impostazione dei seguenti parametri associati al controllo in impedenza nello spazio operativo:

Rigidezze	
K_X [N/m]	3000
K_Y [N/m]	3000
K_Z [N/m]	3000
K_α [Nm/rad]	300
K_β [Nm/rad]	300
K_γ [Nm/rad]	300

Tabella 3.17: parametri di rigidezza impostati per la campagna di prove atte alla verifica della frequenza naturale del sistema controllato nella configurazione di esecuzione del task in esame

Smorzamenti	
D_X	0.1
D_Y	0.1
D_Z	0.1
D_α	1
D_β	1
D_γ	1

Tabella 3.18: parametri di smorzamento adimensionale impostati per la campagna di prove atte alla verifica della frequenza naturale del sistema controllato nella configurazione di esecuzione del task in esame

In questo modo il controllo in impedenza in cartesiano realizza un comportamento idealmente isotropo nelle tre direzioni di traslazione.

Un ingresso di tipo sweep sinusoidale consente l'eccitazione del sistema, nella direzione di applicazione della forza, nel range di frequenza prefissato, consentendo di valutare la risposta del sistema. La semi-ampiezza definita per l'ingresso provoca spostamenti di entità elevata all'end-effector del robot: tale effetto è inevitabile, per quanto deleterio rispetto a eccitazioni e risposte nell'intorno delle posizioni di equilibrio, in quanto il controllo di impedenza prevede una cedevolezza minima, tale da risultare comunque in spostamenti di entità rilevante. Inoltre le accelerazioni, reale grandezza in esame per la risposta, dispongono di un sistema snello di massa limitata, pertanto facilmente eccitabile. Questo, unitamente a considerazioni legate al fatto che il robot è stato progettato per utilizzi a bassa dinamica, suggerisce di limitare comunque le forzanti e considerare

3.3 Definizione del modello del sistema

i risultati alla luce di possibili effetti di amplificazione indotti dalla cedevolezza della struttura.

La determinazione della frequenza naturale del sistema può essere effettuata mediante l'analisi della risposta in frequenza del sistema all'ingresso comandato. La funzione di risposta in frequenza del sistema risulta il rapporto tra l'uscita, l'accelerazione del sistema, e l'ingresso, forzante di tipo sweep sinusoidale, del sistema:

$$H(f) = \frac{out(f)}{in(f)}$$

La risposta in frequenza del sistema può essere stimata mediante l'utilizzo di stimatori, quali ad esempio:

- stimatore H_1 : fornisce la migliore stima della funzione di risposta in frequenza nel caso in cui l'output del sistema sia affetto da rumore, mentre non lo sia l'input del sistema;
- stimatore H_2 : fornisce la migliore stima della funzione di risposta in frequenza nel caso in cui l'input del sistema sia affetto da rumore, mentre non lo sia l'output del sistema.

Si utilizza di uno stimatore per la funzione di risposta in frequenza in quanto l'esatto ottenimento di questa tramite il rapporto uscita/ingresso è possibile solo nel caso di sistema ideale, che presenti le seguenti proprietà: (1) sistema lineare, (2) sistema fisicamente realizzabile, (3) sistema caratterizzato da parametri costanti nel tempo, (4) sistema stabile.

Un sistema reale può risultare, però, non lineare. Inoltre, i segnali associati all'ingresso e all'uscita risultano discreti e possono essere affetti da errori casuali (esempio rumore) ed errori sistematici (esempio leakage).

Sulla base di quanto introdotto, la funzione di risposta in frequenza è stata stimata mediante lo stimatore $H_1(f)$. Tale stimatore risulta migliore rispetto allo stimatore $H_2(f)$ nel caso in esame in quanto il segnale in uscita, ovvero l'accelerazione, è ricavato dalla derivazione del segnale di posizione misurato e tale segnale contiene rumore elettrico, mentre il segnale di ingresso comandato non è caratterizzato da rumore.

Lo stimatore $H_1(f)$ della funzione di risposta in frequenza è legato alla funzione di risposta in frequenza reale del sistema dalla relazione:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} = H_1(f)$$

dove G_{xy} risulta il cross-spettro tra l'ingresso e l'uscita e G_{xx} risulta l'auto-spettro dell'ingresso.

Necessaria risulta, inoltre, la verifica del disaccoppiamento dei gradi di libertà del sistema durante l'esecuzione della prova.

Lo stimatore $H_1(f)$ viene applicato sulle accelerazioni ricavate dagli spostamenti misurati durante l'esecuzione della prova sopra definita nelle direzioni dei gradi di libertà X e Y del sistema. Le accelerazioni sono state filtrate mediante un filtro passa-banda tra le frequenze di applicazione dello sweep sinusoidale in modo eliminare le componenti associate al rumore.

Analisi eccitazione (sweep in forza) in direzione Z

Le accelerazioni ottenute per i tre gradi di libertà traslazionali sono riportate in Figura 3.33, 3.34, 3.35:

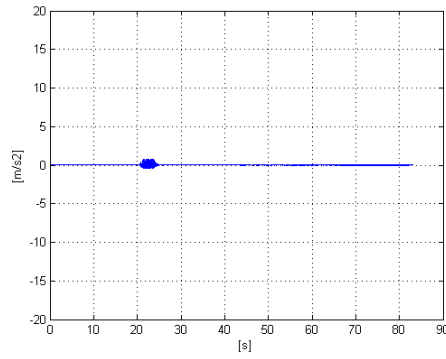


Figura 3.33: accelerazione in direzione X, eccitazione in Z

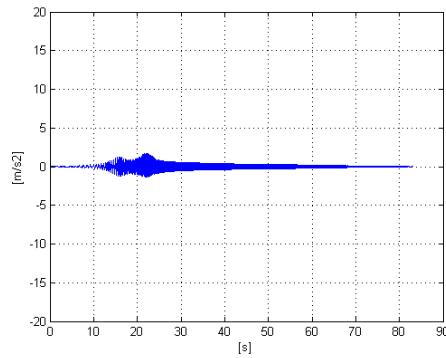


Figura 3.34: accelerazione in direzione Y, eccitazione in Z

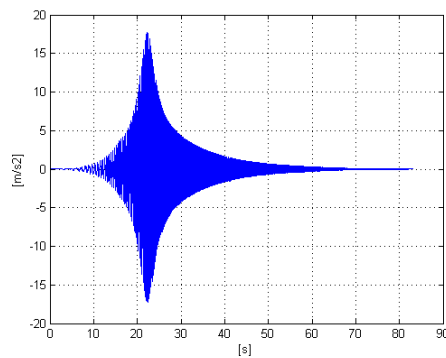


Figura 3.35: accelerazione in direzione Z, eccitazione in Z

3.3 Definizione del modello del sistema

Risulta evidente, dai grafici sopra riportati, come le accelerazioni ottenute in direzione Y siano dello stesso ordine di grandezza rispetto alle accelerazioni ottenute in direzione Z, direzione di applicazione della forzante, almeno nella zona in cui si instaura la risonanza e nella successiva fase di eccitazione. In direzione X, invece, le accelerazioni ottenute risultano di almeno due ordini di grandezza inferiori e sono paragonabili al rumore elettrico contenuto nel segnale. Di conseguenza, i risultati ottenuti dalla stima della funzione di risposta in frequenza risulteranno utilizzabili solo nella direzione Y, mentre la direzione X sembra disaccoppiata dalle altre durante l'esecuzione di tale prova.

Dall'utilizzo dello stimatore $H_1(f)$ si ricava quindi la stima della risposta in frequenza del sistema nei gradi di libertà X, Y, Z, riportata in Figura 3.36, 3.37, 3.38.

Dal grafico del modulo della funzione di risposta in frequenza stimata per il grado di libertà Z è possibile individuare la frequenza naturale del sistema in corrispondenza del relativo picco. Dal grafico della fase della funzione di risposta in frequenza stimata è evidente, in corrispondenza della frequenza associata al picco individuato nel grafico del modulo, un cambio di fase di 180° che identifica una frequenza naturale del sistema.

Per la configurazione del sistema analizzata, che risulta quella in cui deve operare per l'esecuzione del task, si ottiene quindi una prima frequenza naturale a 4.1 Hz.

Importante è notare che il sistema non si comporta, dopo la risonanza, come un sistema del secondo ordine del tipo massa-molla-smorzatore in quanto non si riscontra il classico decadimento del modulo di 40 db/dec. Questo fa presupporre che i gradi di libertà si accoppino durante l'esecuzione della prova oltre la frequenza propria, ovvero non vi sia disaccoppiamento ad alta dinamica.

Analizzando il modulo della risposta in frequenza stimata per il grado di libertà Y si riscontra una prima zona, caratterizzata da frequenze inferiori a quella di risonanza per il grado di libertà Z, in cui il relativo andamento risulta di due ordini di grandezza inferiore rispetto al modulo della funzione di risposta in frequenza stimata per il grado di libertà Z. Questo fa presupporre che in tale range di frequenze, compreso tra 0 - 1.75 Hz, i gradi di libertà Y e Z risultino disaccoppiati. Tale range di frequenze corrisponde ad un andamento costante del modulo della funzione di risposta in frequenza stimata. Invece, nel successivo range di frequenza si riscontra un allineamento dei valori corrispondenti al modulo della funzione di trasferimento stimata per i due gradi di libertà. Questo fa presupporre che tali gradi di libertà si accoppino, restituendo un moto ellittico dell'end-effector nel piano da essi individuato.

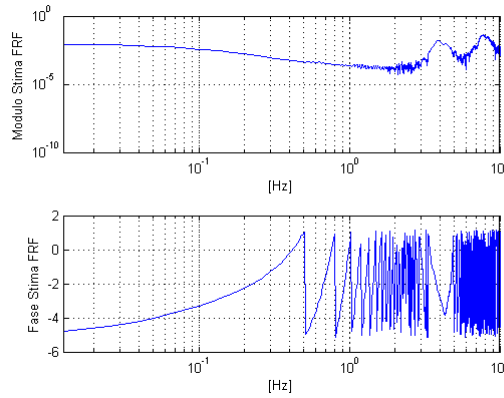


Figura 3.36: stima della FRF del sistema per il grado di libertà X

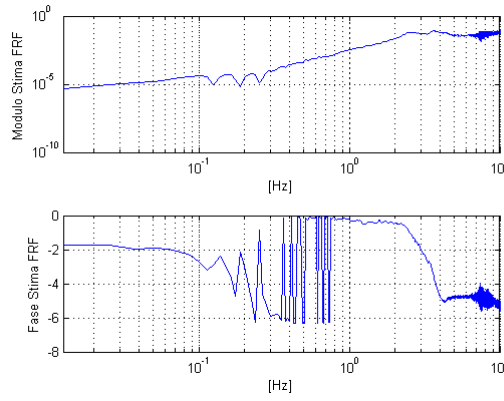


Figura 3.37: stima della FRF del sistema per il grado di libertà Y

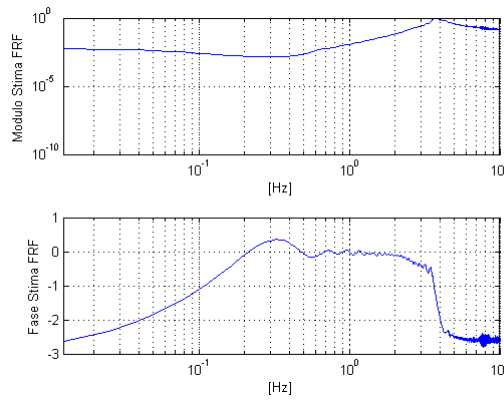


Figura 3.38: stima della FRF del sistema per il grado di libertà Z

3.3 Definizione del modello del sistema

Analisi spostamenti

Una verifica effettuata per la valutazione dell'accoppiamento tra i gradi di libertà durante l'esecuzione della prova risulta associata alla visualizzazione degli spostamenti nel piano X - Z e alla visualizzazione degli spostamenti nel piano Y - Z. Il piano Y - Z risulta quello in cui giace il robot nella configurazione in esame, mentre il piano X - Z è un piano normale al precedente, passante per il TCP. Movimenti in tale piano rappresentano, per la configurazione in esame, uno sbandieramento del robot al di fuori del piano naturale in cui è atteso il moto e in cui è prevedibile ottenere un asse dell'ellissoide di velocità molto ridotto.

In Figura 3.39 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano X - Z durante tutta l'esecuzione della prova (0 - 10 Hz).

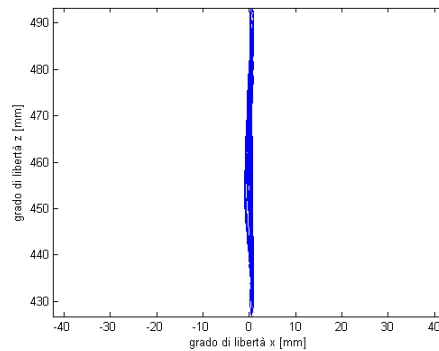


Figura 3.39: spostamenti nel piano X - Z [0 - 10 Hz]

In Figura 3.40 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano Y - Z nel range di frequenze 0 - 1.75 Hz.

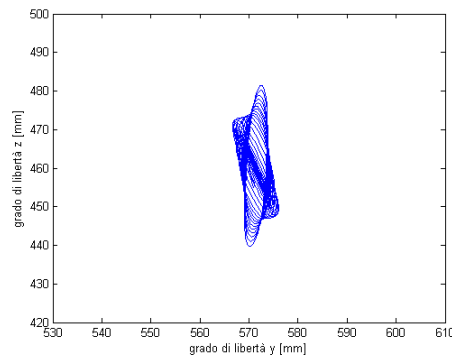


Figura 3.40: spostamenti Y - Z [0 - 1.75 Hz]

Dall'andamento ottenuto in Figura 3.39 è evidente come l'end-effector risulta in movimento nella sola direzione Z. Ciò evidenzia come il sistema risulti disaccoppiato nei due gradi di libertà, risultato concorde con le osservazioni precedenti.

Dall'andamento ottenuto in Figura 3.40 risulta evidente come l'ellisse disegnata dal moto del sistema nel piano in esame, dopo un assestamento di configurazione iniziale, sia caratterizzato da una direzione predominante di moto nella direzione dell'asse Z. Un primo assestamento del moto a basse frequenze può essere dovuto al fatto che il controllo risulti molto sensibile al parametro di carico impostato all'end-effector. Questo fa sì che si abbia un transitorio a basse frequenze sul comportamento dinamico del sistema.

In Figura 3.42 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano Y - Z nel range di frequenze 1.75 - 2.75 Hz. Da tale andamento si evidenzia un comportamento disaccoppiato del sistema per i gradi di libertà Y e Z. Si deduce, quindi, che dopo una prima fase di transitorio iniziale alle basse frequenze il sistema risulti disaccoppiato.

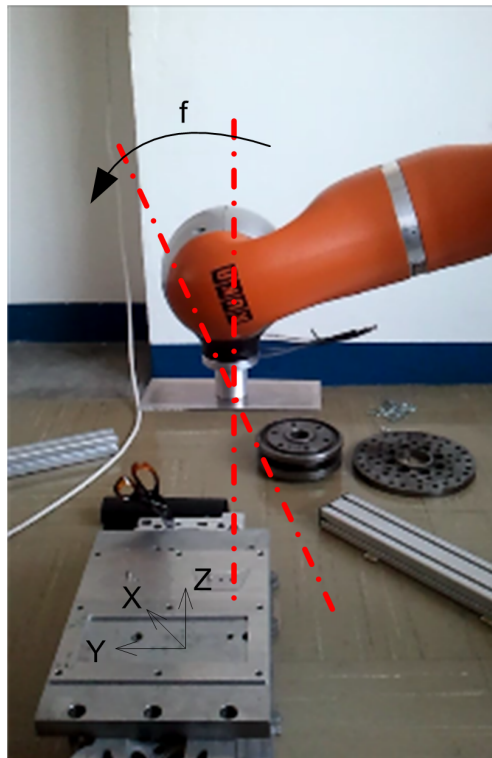


Figura 3.41: direzione di accoppiamento nel piano Y - Z

3.3 Definizione del modello del sistema

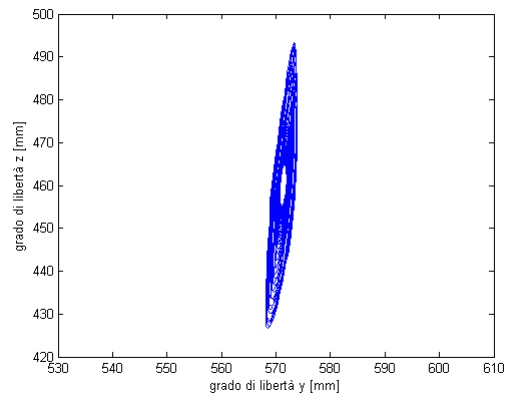
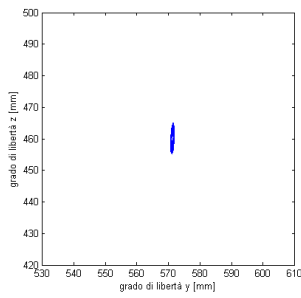
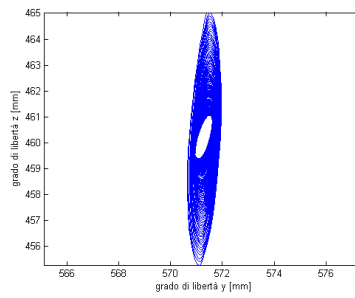


Figura 3.42: spostamenti Y - Z [1.75 - 2.75 Hz]

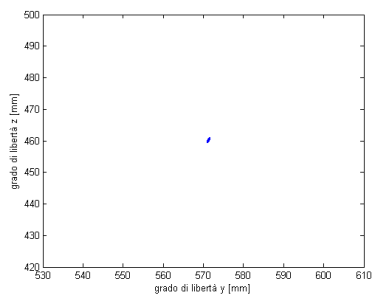


(spostamenti Y - Z [2.75 - 4.75 Hz])

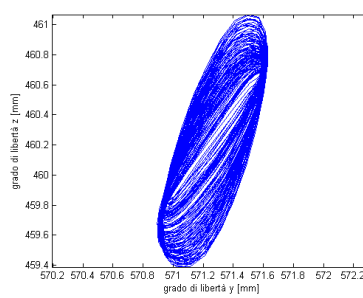


(dettaglio)

Figura 3.43: spostamenti Y - Z [2.75 - 4.75 Hz]



(spostamenti Y - Z [4.75 - 5.75 Hz])



(dettaglio)

Figura 3.44: spostamenti Y - Z [4.75 - 5.75 Hz]

In Figura 3.43 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano Y - Z nel range di frequenze 2.75 - 4.75 Hz.

In tale range di frequenze, in cui cade la frequenza naturale del sistema per il grado di libertà Z, lo spostamento in direzione Z ha assunto il medesimo ordine di grandezza dello spostamento lungo Y. Inoltre, la direzione di moto del sistema risulta assumere un'inclinazione differente dalla verticale (Figura 3.41) che evidenzia un accoppiamento tra i due gradi di libertà. Tale comportamento del sistema persiste nel successivo range di frequenze (Figura 3.44, 4.75 - 5.75 Hz). Di conseguenza, il sistema a frequenze superiori a 2.75 Hz non può essere più trattato come un sistema del secondo ordine disaccoppiato, ma l'identificazione di un modello che rispecchi il vero comportamento dinamico del sistema, oggetto di sviluppi futuri, deve necessariamente trattare un sistema di ordine superiore, come osservato in precedenza.

verifica accoppiamento nelle bande di frequenza analizzate		
banda [Hz]	accoppiamento	angolo ellisse di moto [°]
0 - 1.75	no (transitorio)	153 - 90
1.75 - 2.75	no	90 ± 2
2.75 - 4.75	sì	90 - 70
4.75 - 5.75	sì	70 - 60

Tabella 3.19: accoppiamento tra i gradi di libertà Y e Z e angolo ellisse di moto nel relativo piano, con eccitazione imposta lungo Z

Analisi eccitazione (sweep in forza) in direzione X e Y

La medesima prova è stata condotta imponendo un ingresso di tipo sweep sinusoidale, tra le frequenze 0 - 10 Hz e di semi-ampiezza pari a 20 N, in direzione dei gradi di libertà X ed Y.

Il set-up realizzato per lo svolgimento della suddetta prova mantiene gli stessi parametri associati al controllo in impedenza nello spazio operativo utilizzati per l'eccitazione lungo Z:

Rigidezze		
	ingresso lungo X	ingresso lungo Y
K_X [N/m]	3000	3000
K_Y [N/m]	3000	3000
K_Z [N/m]	3000	3000
K_α [Nm/rad]	300	300
K_β [Nm/rad]	300	300
K_γ [Nm/rad]	300	300

Tabella 3.20: parametri di rigidezza impostati

3.3 Definizione del modello del sistema

Smorzamenti		
	ingresso lungo X	ingresso lungo Y
D_X	0.1	0.1
D_Y	0.1	0.1
D_Z	0.1	0.1
D_α	1	1
D_β	1	1
D_γ	1	1

Tabella 3.21: parametri di smorzamento adimensionale impostati

Le accelerazioni ottenute, filtrate tra 0 - 10 Hz, per i tre gradi di libertà traslazionali sono riportate in Figura 3.45.

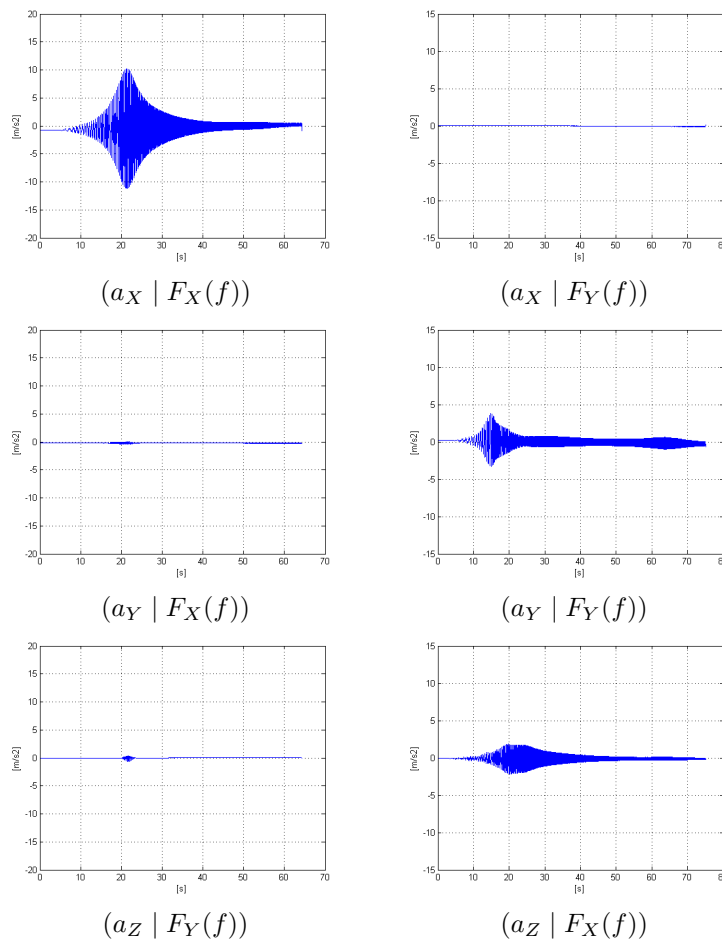


Figura 3.45: accelerazioni sui tre gradi di libertà

Dall'utilizzo dello stimatore $H_1(f)$ si ricava quindi la stima della risposta in frequenza del sistema nei gradi di libertà X, Y, Z nelle due prove, riportata in Figura 3.46.

Analizzando la stima della funzione di risposta in frequenza nel grado di libertà X, ottenuta imponendo un ingresso di tipo sweep sinusoidale in tale direzione, si ottiene una frequenza naturale pari a 4.1 Hz. Risultando le accelerazioni associate agli altri due gradi di libertà di almeno due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle associate al grado di libertà in esame e proporzionali al rumore elettrico, la relativa stima della funzione di risposta in frequenza risulta inutilizzabile.

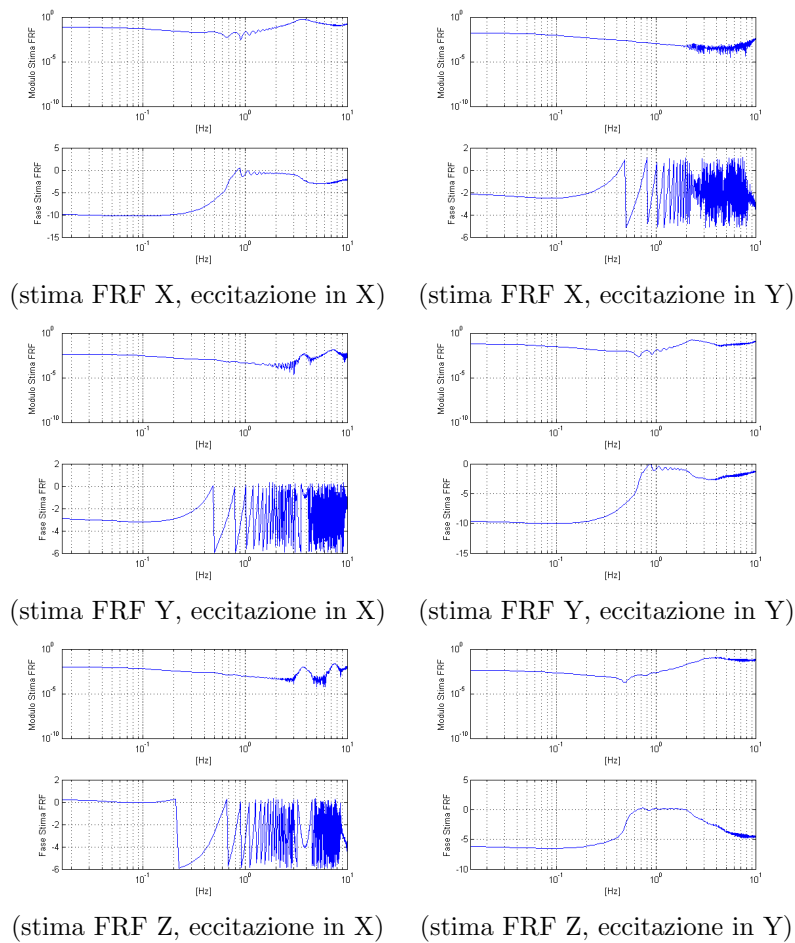


Figura 3.46: stima delle funzioni di risposta in frequenza per i tre gradi di libertà

3.3 Definizione del modello del sistema

Analizzando la stima della funzione di risposta in frequenza nel grado di libertà Y, ottenuta imponendo un ingresso di tipo sweep sinusoidale in tale direzione, si ottiene una frequenza naturale pari a 2.55 Hz. Le accelerazioni ottenute per il grado di libertà X risultano almeno due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle associate al grado di libertà in esame. La relativa stima della funzione di risposta in frequenza risulta inutilizzabile. Le accelerazioni ottenute per il grado di libertà Z risultano dello stesso ordine di grandezza di quelle ottenute per il grado di libertà Y. Questo, come nell'analisi effettuata sul grado di libertà Z, fa presupporre un accoppiamento tra i due gradi di libertà. Analizzando i valori associati al modulo della funzione di risposta in frequenza stimata per tali gradi di libertà si evidenzia, infatti, un ordine di grandezza confrontabile.

Analisi spostamenti

In Figura 3.47 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano X - Z durante tutta l'esecuzione della prova con eccitazione lungo l'asse X. Da tale andamento è evidente come l'end-effector risulta in movimento nella sola direzione X. Ciò evidenzia come il sistema risulti disaccoppiato nei due gradi di libertà, risultato concorde con le osservazioni precedenti.

In Figura 3.48 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano X - Y durante tutta l'esecuzione della prova con eccitazione lungo l'asse X. Da tale andamento è evidente come l'end-effector risulta in movimento nella sola direzione X. Ciò evidenzia come il sistema risulti disaccoppiato nei due gradi di libertà, risultato concorde con le osservazioni precedenti.

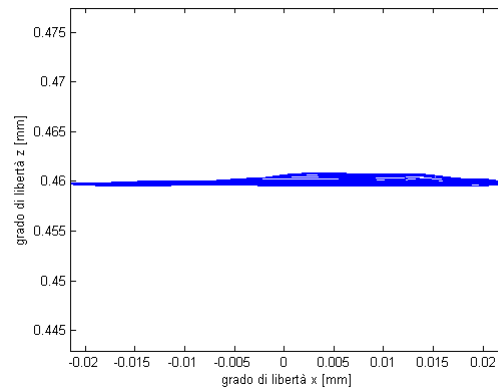


Figura 3.47: spostamenti dell'end-effector nel piano X - Z, eccitazione lungo X

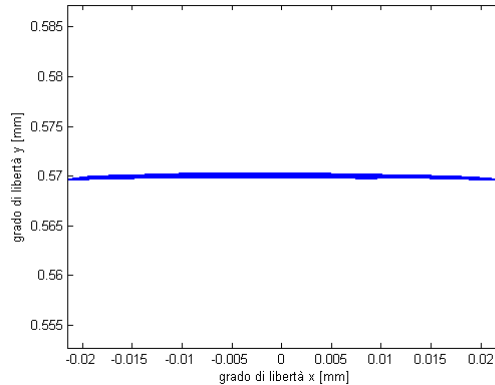


Figura 3.48: spostamenti dell'end-effector nel piano X - Y, eccitazione lungo X

In Figura 3.49 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano X - Y durante tutta l'esecuzione della prova con eccitazione lungo l'asse Y. Da tale andamento è evidente come l'end-effector risulta in movimento nella sola direzione Y. Ciò evidenzia come il sistema risulti disaccoppiato nei due gradi di libertà, risultato concorde con le osservazioni precedenti.

In Figura 3.50 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano Y - Z nel range di frequenze 0 - 1.25 Hz, con eccitazione lungo l'asse Y. Da tale andamento è evidente come l'end-effector risulta in movimento nella sola direzione Y. Ciò evidenzia come il sistema risulti disaccoppiato nei due gradi di libertà, risultato concorde con le osservazioni precedenti.

In Figura 3.51 è visualizzato l'andamento dello spostamento dell'end-effector nel piano Y - Z nel range di frequenze 1.25 - 2.5 Hz, con eccitazione lungo l'asse Y. Da tale andamento è evidente come l'end-effector risulta in movimento sia nella direzione Y, sia nella direzione Z. Ciò evidenzia come il sistema risulti accoppiato nei due gradi di libertà a partire da una frequenza inferiore a quella di risonanza per il sistema nella direzione Y.

verifica accoppiamento nelle bande di frequenza analizzate		
banda [Hz]	accoppiamento	angolo ellisse di moto [°]
0 - 1.25	no	180 - 170
1.25 - 2.5	si	170 - 90

Tabella 3.22: accoppiamento tra i gradi di libertà Y e Z e angolo ellisse di moto nel relativo piano, con eccitazione imposta lungo Y

3.3 Definizione del modello del sistema

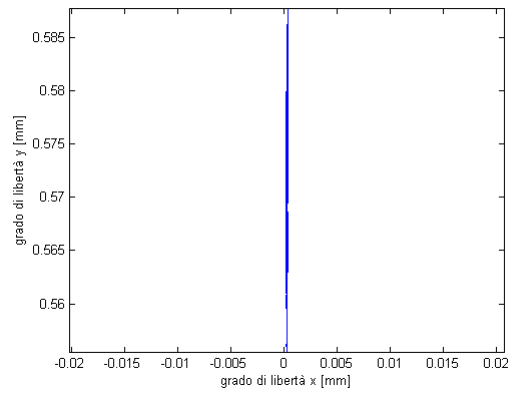


Figura 3.49: spostamenti nel piano X - Y, eccitazione lungo Y

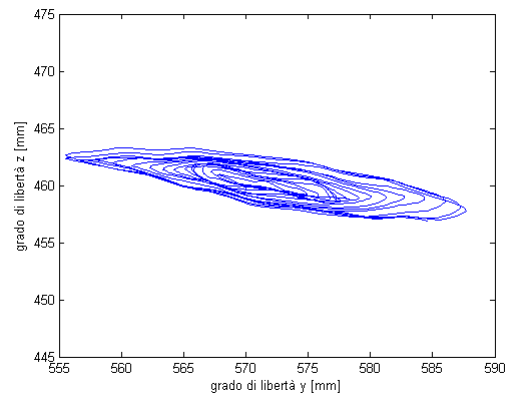
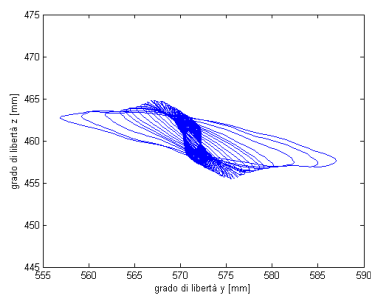
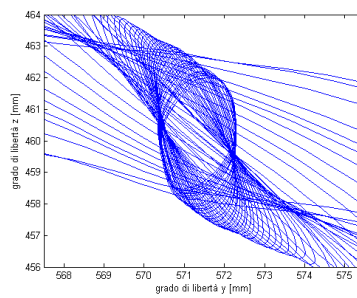


Figura 3.50: spostamenti nel piano Y - Z [0 - 1.25 Hz], eccitazione lungo Y



(spostamenti Y - Z [1.25 - 2.5 Hz])



(dettaglio)

Figura 3.51: spostamenti Y - Z [1.25 - 2.5 Hz], eccitazione lungo Y

Stima delle massa dalla verifica delle frequenze proprie

Nelle già discusse ipotesi di (1) località del modello in funzione della configurazione e (2) bassa dinamica del task in esecuzione, e allo scopo di sviluppare una simulazione del sistema controllato, si considera in prima approssimazione un sistema totalmente disaccoppiato, caratterizzato da parametri di massa ricavati dalla relazione:

$$m_i = \frac{K_i}{\omega_{0i}^2}$$

dove m_i è la massa equivalente al grado di libertà lungo la direzione i -esima, K_i è la rigidità impostata dal controllo la direzione i -esima, ω_{0i} è la frequenza naturale associata al grado di libertà lungo la direzione i -esima.

Da questo si ottengono i valori di massa per i tre gradi di libertà traslazionali:

masse stimate	
grado di libertà	massa stimata [kg]
x	4.5
y	11.5
z	4.5

Tabella 3.23: parametri di massa stimati

Il valore di massa associato al grado di libertà Y stimato risulta maggiore rispetto ai valori stimati per i gradi di libertà X e Z in quanto, nella configurazione in esame, il robot risulta maggiormente cedevole in direzione Y rispetto alle altre direzioni. Questo comporta una frequenza propria di oscillazione inferiore, e di conseguenza, una massa associata superiore.

L'approssimazione introdotta sulla stima dei valori di massa nelle tre direzioni traslazionali risulta accettabile in quanto l'effettiva instaurazione dell'accoppiamento tra i gradi di libertà, nella configurazione considerata, subentra solo nella zona di risonanza del grado di libertà in cui viene imposto lo sweep sinusoidale di forza. Inoltre, il Kuka LWR nasce per essere utilizzato a basse frequenze, dove l'effettivo comportamento del sistema risulta disaccoppiato. Il modello è, infatti, utilizzato per una stima dell'interazione sulla quale definire la strategia adattativa di configurazione dei parametri di controllo per l'esecuzione del task, il cui aggiornamento prevede costanti di tempo elevate rispetto alla frequenza del controllo in impedenza nello spazio operativo (1 [kHz]). Inoltre, il task in esecuzione risulta effettivamente a bassa dinamica, con velocità ridotte e accelerazioni/forza scambiate smorzate. Si può pertanto assumere che tale approssimazione sia accettabile, in quanto non vengono sollecitate bande critiche per il controllo in anello chiuso.

3.3 Definizione del modello del sistema

I parametri stimati risultano validi per la configurazione del robot in cui è stata eseguita la prova, configurazione in cui viene eseguito il task, e per il task in esame. Per la realizzazione di una generica operazione è necessario effettuare le valutazioni riportate nella relativa configurazione. Se l'operazione da svolgere vede il robot impiegato a frequenze maggiori a quelle di risonanza, con conseguente accoppiamento dei gradi di libertà risulta necessaria una stima del modello del sistema accoppiato, comprendente la matrice completa di massa, la matrice completa di smorzamento e la matrice completa di rigidità, le quali saranno caratterizzate da termini extra-diagonali non nulli.

$$\begin{bmatrix} m_{xx}(\mathbf{q}, f) & m_{xy}(\mathbf{q}, f) & m_{xz}(\mathbf{q}, f) & 0 & 0 & 0 \\ m_{yx}(\mathbf{q}, f) & m_{yy}(\mathbf{q}, f) & m_{yz}(\mathbf{q}, f) & 0 & 0 & 0 \\ m_{zx}(\mathbf{q}, f) & m_{zy}(\mathbf{q}, f) & m_{zz}(\mathbf{q}, f) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{xx}(\mathbf{q}, f) & J_{xy}(\mathbf{q}, f) & J_{xz}(\mathbf{q}, f) \\ 0 & 0 & 0 & J_{yx}(\mathbf{q}, f) & J_{yy}(\mathbf{q}, f) & J_{yz}(\mathbf{q}, f) \\ 0 & 0 & 0 & J_{zx}(\mathbf{q}, f) & J_{zy}(\mathbf{q}, f) & J_{zz}(\mathbf{q}, f) \end{bmatrix}$$

Tale Definizione della matrice di massa introduce una semplificazione, ovvero risultano disaccoppiati i termini traslazionali dai termini rotazionali.

Analisi dell'applicazione di uno sweep di coppia ai gradi di libertà rotazionali

La medesima prova è stata condotta imponendo un ingresso di tipo sweep sinusoidale, tra le frequenze 0 - 10 Hz e di semi-ampiezza pari a 2 Nm, al grado di libertà rotazionale β , rotazione intorno all'asse Y.

Il set-up realizzato per lo svolgimento della suddetta prova prevede l'impostazione dei seguenti parametri associati al controllo in impedenza nello spazio operativo:

Rigidezze	
K_X [N/m]	3000
K_Y [N/m]	3000
K_Z [N/m]	3000
K_α [Nm/rad]	300
K_β [Nm/rad]	20
K_γ [Nm/rad]	300

Tabella 3.24: parametri di rigidità impostati per l'esecuzione della prova sul grado di libertà β

In questo caso, data la criticità associata all'analisi relativa ai gradi di libertà rotazionali a causa di un'elevata non linearità trigonometrica, si effettua una stima della funzione di risposta in frequenza per il solo grado di libertà β , in modo tale da avere una stima di massima del parametro di momento di inerzia da considerare nel modello dinamico sviluppato.

Smorzamenti	
D_X	1
D_Y	1
D_Z	1
D_α	1
D_β	0.1
D_γ	1

Tabella 3.25: parametri di smorzamento adimensionale impostati per l'esecuzione della prova sul grado di libertà β

Non si valuta l'eventuale accoppiamento tra i gradi di libertà rotazionale in quanto la complessità di analisi risulta molto maggiore rispetto all'analisi effettuata sui gradi di libertà traslazionali. Inoltre, durante l'esecuzione del task in esame prevalgono spostamenti di tipo traslazionale rispetto a quelli rotazionali, consentendo di applicare a questi ultimi un grado di approssimazione maggiore sui parametri stimati.

Le accelerazioni ottenute, filtrate tra 0 - 10 Hz, per il grado di libertà considerato sono riportate in Figura 3.52:

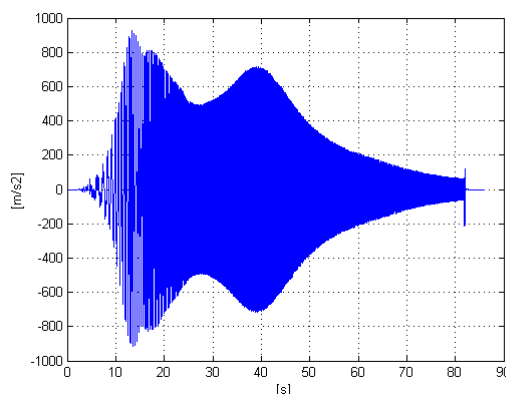


Figura 3.52: accelerazione lungo il grado di libertà rotazionale β

Dall'utilizzo dello stimatore $H_1(f)$ si ricava quindi la stima della risposta in frequenza del sistema per tale grado di libertà, riportata in Figura 3.53.

Dalla stima della funzione di risposta in frequenza si ottiene una prima frequenza naturale a circa 2.5 Hz. Dal valore ottenuto è possibile effettuare una stima del momento di inerzia associato a tale grado di libertà:

$$J = \frac{K_\beta}{(2\pi f_0)^2} = 0.096 \text{kgm}^2$$

3.3 Definizione del modello del sistema

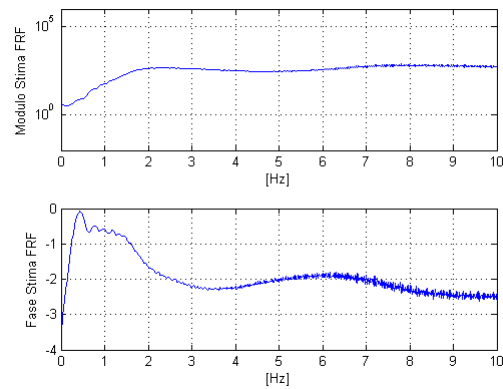


Figura 3.53: stima della FRF del sistema per il grado di libertà rotazionale β

Sintesi dei risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono sintetizzati nelle tabelle di seguito.

Sintesi risultati: verifica rigidezza		
carico	rigidezza	
	da controllo	realizzata
[N]	[N/m]	[N/m]
37	1000	1057
45	1000	978
65	1000	984

Tabella 3.26: Sintesi dei risultati ottenuti dalla verifica dei parametri di rigidezza

Sintesi risultati: verifica smorzamento adimensionale		
set-up	smorzamento	
	da controllo	realizzato
1	0.1	0.1404
2	0.1	0.1212
3	0.7	0.7317

Tabella 3.27: Sintesi dei risultati ottenuti dalla verifica dei parametri di smorzamento adimensionale

Sintesi risultati: stima massa		
grado di libertà	massa stimata [kg]	banda di validità [Hz]
X	4.5	0 - 10
Y	11.5	0 - 1.25
Z	4.5	0 - 2.75

Tabella 3.28: Sintesi dei risultati ottenuti dalla stima dei parametri di massa

Sintesi risultati: stima momento d'inerzia		
grado di libertà	momento di inerzia stimato [kgm ²]	banda di validità [Hz]
J_X	0.095	0 - 2.5
J_Y	0.095	0 - 2.5
J_Z	0.095	0 - 2.5

Tabella 3.29: Sintesi dei risultati ottenuti dalla stima dei parametri di momento d'inerzia

3.3.7 Modellazione del sistema nello spazio: 6 gdl

Il modello dell'interazione tra sistema robotico e ambiente descritto nel paragrafo 3.3.1 è stato espanso dai 3 gradi di libertà nel piano, ai 6 gradi di libertà nello spazio. Questo si rende necessario per lo studio completo dell'interazione, in modo tale da determinare l'entità delle possibili forze e coppie che ne scaturiscono. Il modello a 3 gradi di libertà non consente, infatti, di valutare il comportamento del sistema robotico controllato in interazione con più lati della sede, che può provocare sobbalzi imprevisti che possono causare la mancata esecuzione del task. Inoltre il modello a 3 gradi di libertà non consente il calcolo completo delle forze e delle coppie risultanti all'end-effector. Grazie a tale raffinazione del modello si è potuto determinare una strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo che, sulla base dell'interazione instaurata, consenta l'esecuzione del task.

I gradi di libertà associati al sistema robot considerati, comprendente la geometria da assemblare in quanto rigidamente collegata ad esso, risultano quindi tre traslazioni e tre rotazioni:

$$\Delta \mathbf{x}_R = [X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma]^T$$

Tali gradi di libertà risultano associati al primo punto immerso nella sede relativa alla geometria da assemblare, per le ragioni sopra riportate.

3.3 Definizione del modello del sistema

Il sistema in esame, schematizzato nello spazio, risulta quello riportato in Figura 3.54.

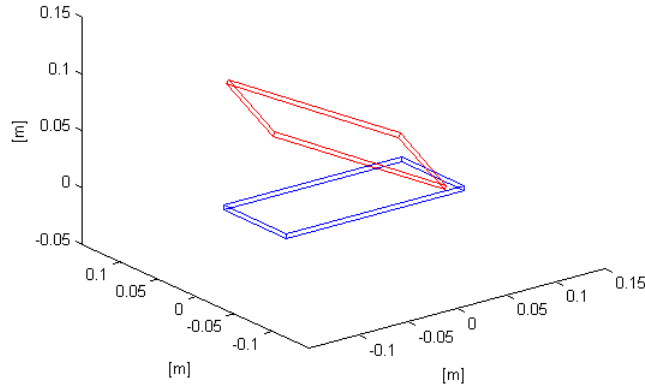


Figura 3.54: sistema schematizzato nello spazio (in rosso è schematizzata la geometria trattata, mentre in blu la relativa sede)

Il sistema equivalente robot è caratterizzato da un'espressione matriciale del tipo:

$$\begin{bmatrix} m_X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_Y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_\gamma \end{bmatrix} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_R + \begin{bmatrix} d_X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_Y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_\gamma \end{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_R + \begin{bmatrix} k_X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_Y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_\gamma \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_R = \mathbf{f}_R$$

I parametri relativi allo smorzamento e alla rigidità associati al sistema equivalente risultano quelli impostati da controllo.

I contatti che si possono instaurare tra robot e ambiente sono stati modellati in modo analogo a quanto illustrato in precedenza per il modello a 3 gradi di libertà. In particolare, il numero di contatti modellato risulta maggiore e risulta più complessa la relativa modellazione a causa della maggior complessità geometrica del problema trattato nello spazio.

Le azioni realizzate dai contatti robot-ambiente sono contenute nel vettore \mathbf{f}_R .

Il modello disaccoppiato così scritto risulta valido, sulla base delle osservazioni riportate nel paragrafo precedente, per il task in esame e per la config-

urazione considerata, nell'ipotesi in cui il sistema lavori a frequenze inferiori a quella di risonanza.

Nel caso in cui il robot si trovi a lavorare a frequenze maggiori i gradi di libertà risultano accoppiati. In tal caso, le matrici di massa, smorzamento e rigidità non risulterebbero più diagonali (Vedi paragrafo 3.3.6), ma sarebbero presenti dei termini extra-diagonali non nulli a causa dell'accoppiamento instaurato.

Le interazioni (forze/coppie scambiate) e il moto risultante del sistema ricalcano per estensione quello proposto per il modello semplificato nel piano, e vengono illustrate nel capitolo successivo nel caso della specifica esecuzione del task di inserimento.

Capitolo 4

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

Sulla base del modello a 6 gradi di libertà introdotto nel paragrafo 3.3.7, che riproduce il comportamento dinamico del sistema con controllo in impedenza nello spazio operativo, è stata sviluppata una strategia di configurazione adattativa che consenta, in funzione dell'interazione tra robot e ambiente, la modifica dei parametri di controllo *on-line*.

In letteratura sono presenti metodologie per l'esecuzione di task di inserzione che necessitano, però, della conoscenza della geometria della forma manipolata (vedi, ad esempio, [27]). Il motivo che ha spinto allo sviluppo di strategie del tipo sopra citato è dato dal fatto che si vuole eseguire il task senza effettuare alcuna modellazione, geometrica o meccanica, dell'ambiente con cui il robot è a contatto.

La strategia sviluppata è stata pensata sulla base della comune procedura seguita per l'inserzione di un componente nella relativa sede. In particolare, vengono definite due tipologie di direzioni:

- direzione di esplorazione: direzione in cui il movimento non risulta vincolato meccanicamente dall'ambiente;
- direzione di contatto: direzione in cui il movimento risulta soggetto ad un vincolo meccanico imposto dall'ambiente esterno.

Per l'esecuzione del task in esame, la strategia prevede di seguire i seguenti passi logici:

- il componente viene posizionato al di sopra della relativa sede e viene orientato in modo tale da avere l'inserimento di un primo vertice. Da sottolineare è il fatto che tale prima operazione risulta l'unica operazione manuale da effettuare. Non avendo a disposizione un apparato sensoriale, come ad esempio un sistema di visione, che consenta di individuare la sede dell'assemblaggio è necessario portare l'end-effector al di sopra di essa. L'inserzione del primo vertice mediante l'orientamento della geometria trattata, oltre ad essere un'operazione comunemente svolta in un task

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

di assemblaggio, consente di definire automaticamente e in modo facile ed univoco le direzioni di esplorazione. Importante è il fatto che tale operazione risulta indipendente dalla geometria trattata, e di conseguenza la generalità dell'applicazione di tale strategia non è compromessa. Lungo l'asse verticale Z viene definita la prima direzione di esplorazione. Lungo tale direzione viene quindi movimentato il componente. Per fare questo, viene modificata la componente lungo Z del set-point impostato dal controllo in impedenza nello spazio operativo, portandola progressivamente verso il basso, finché non avviene il contatto con l'ambiente. Non identificando la posizione della sede nello spazio, in questa prima fase il set-point viene modificato lungo la direzione Z di una quantità prefissata ad ogni aggiornamento del ciclo di controllo della strategia. Il contatto viene riconosciuto analizzando le forze stimate all'end-effector, proiettate in un sistema di riferimento parallelo al sistema di riferimento fisso che individua la sede di assemblaggio. Avvenuto il contatto, tale direzione non risulterà più una direzione di esplorazione, bensì una direzione di contatto. La componente lungo Z del set-point di controllo viene modificata in modo tale da generare una forza di entità desiderata, che garantisca il contatto in tale direzione;



Figura 4.1: direzione di esplorazione Z

-
- avvenuto il primo inserimento, si definiscono due direzioni di esplorazione, X e Y, nel piano orizzontale. La prima direzione X di esplorazione viene definita sulla base della lettura della rotazione del componente rispetto all'asse Y. Tale dato determina, infatti, se il primo vertice inserito nella sede risulta quello anteriore o posteriore, consentendo così di definire la conseguente direzione di esplorazione, in modo tale da ricercare il contatto con la sede. La seconda direzione Y di esplorazione viene definita sulla base della lettura della rotazione del componente rispetto all'asse X. Tale dato determina, infatti, se il primo vertice inserito nella sede risulta quello sul lato destro o sul lato sinistro del componente, consentendo così di definire la conseguente direzione di esplorazione, in modo tale da ricercare il contatto con la sede. Sulla base delle forze misurate nelle due direzioni vengono modificate le relative componenti del set-point di controllo, secondo la relazione:

$$\Delta \mathbf{X} \propto \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f}$$

dove il vettore \mathbf{X} è il vettore contenente i gradi di libertà traslazionali X, Y, Z, il vettore \mathbf{f} è il vettore contenente le componenti di forza f_X , f_Y , f_Z e la matrice \mathbf{K} è diagonale, contenente i termini K_X , K_Y , K_Z .

La movimentazione del set-point di controllo consente la movimentazione del componente sulla superficie della sede, consentendo così di esplorare l'ambiente alla ricerca dei relativi contatti. Avvenuto il contatto lungo una direzione, tale direzione diventa direzione di contatto. La relativa componente del set-point di controllo viene modificata in modo tale da generare una forza di entità desiderata, che garantisca il contatto in tale direzione;

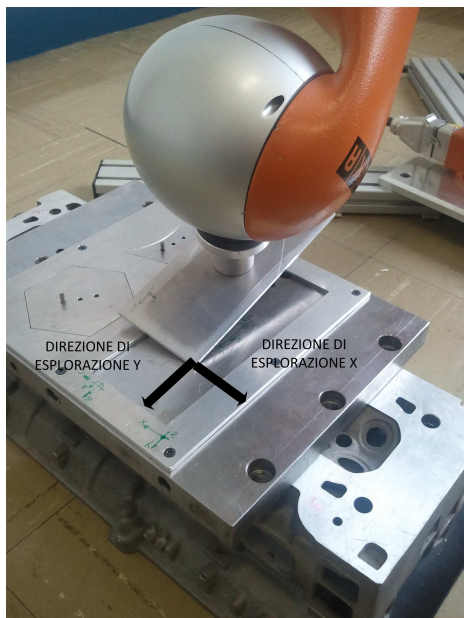


Figura 4.2: direzione di esplorazione X e Y

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

- contemporaneamente all'esecuzione della fase precedente si procede con la rotazione del componente, in modo tale da completare il task di assemblaggio. Le direzioni di esplorazione coincidono con le rotazioni associate al componente. Sulla base delle coppie misurate viene definita la matrice di rotazione associata al set-point di controllo:

$$\Delta\theta \propto \mathbf{K}^{-1}\mathbf{C}$$

dove il vettore $\Delta\theta$ è il vettore contenente i gradi di libertà rotazionali α , β , γ , il vettore \mathbf{C} è il vettore contenente le componenti di forza C_X , C_Y , C_Z e la matrice \mathbf{K} è diagonale, contenente i termini K_α , K_β , K_γ . Quando una rotazione risulta soggetta ad un vincolo dato dall'ambiente, tale direzione diventa di contatto e viene definita una coppia di entità desiderata, che garantisca il contatto.

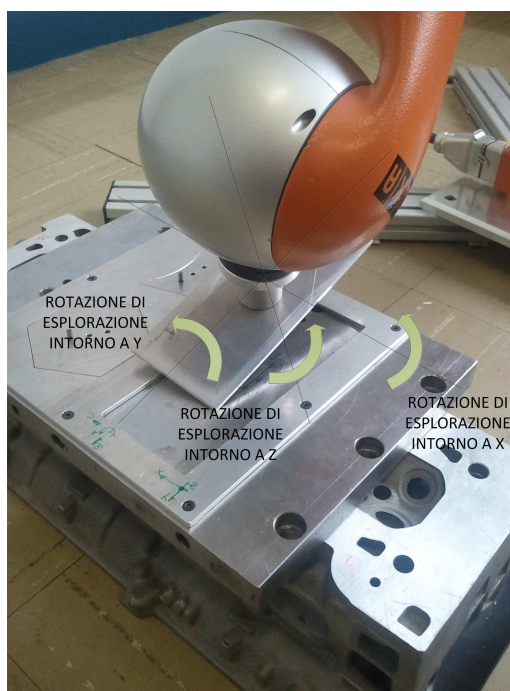


Figura 4.3: rotazioni di esplorazione

Un parallelo che consenta una descrizione ulteriore della strategia sviluppata è possibile effettuarlo con il controllo ibrido (vedi paragrafo 2.1). Il controllo ibrido consente la definizione contemporanea di riferimenti di posizione/velocità o forza lungo i gradi di libertà del sistema, separatamente. Nel caso in esame, le direzioni di esplorazione corrispondono alla definizione di un riferimento di posizione/velocità nel controllo ibrido, mentre le direzioni di contatto corrispondono alla definizione di un riferimento di forza nel controllo ibrido unitamente ad un controllo di velocità con set-point nullo in direzione normale al contatto, al fine di irrobustire il mantenimento del contatto. Rispetto al controllo ibrido, però, alcun riferimento viene definito, ma la strategia agisce sulla definizione del

set-point di controllo. La definizione di un riferimento di forza sarebbe, infatti, possibile imponendo una forza di contatto desiderata, parimenti a quanto imposto come condizione di equilibrio in impedenza desiderata. Tuttavia, sarebbe impossibile definire un riferimento di posizione essendo non nota la forma. Un riferimento di velocità dovrebbe, invece, considerare una discriminante per un feedback di velocità nulla, causato dal raggiungimento del vincolo oppure da una condizione di transitorio nell'inseguimento del riferimento di velocità. L'aggiornamento invece di un set-point di impedenza consente di adattare continuamente la strategia di controllo alle condizioni locali. Lungo le direzioni di esplorazione il set-point viene continuamente aggiornato in modo da consentire la movimentazione del componente. Questo significa, a parità dei parametri di rigidezza impostati, allontanare il set-point di controllo in tale direzione di esplorazione. Lungo le direzioni di contatto, invece, il set-point viene aggiornato in modo tale da garantire una forza di contatto definita. Questo significa, a parità dei parametri di rigidezza impostati, modificare la componente del set-point di controllo in tale direzione avvicinandola se la forza di interazione è maggiore della soglia impostata o, viceversa, allontanandola se la forza di interazione è minore della soglia impostata:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{f_x - f^0}{K_x} & \text{se } f_x < f^0 - f_{toll} \\ \Delta x = -\frac{f_x - f^0}{K_x} & \text{se } f_x > f^0 + f_{toll} \end{cases}$$

Parametri impostati per la definizione della strategia		
grado di libertà	valore desiderato di forza (f^0) [N]	tolleranza (f_{toll}) [N]
X	-30	± 2.5
Y	30	± 2.5
Z	30	± 2.5

Tabella 4.1: Forze desiderate e relative tolleranze impostate

Parametri impostati per la definizione della strategia		
grado di libertà	valore desiderato di coppia [Nm]	tolleranza [Nm]
α	-3	± 1.5
β	3	± 1.5
γ	3	± 1.5

Tabella 4.2: Coppie desiderate e relative tolleranze impostate

L'aggiornamento del set-point di controllo fa sì che il controllo in impedenza nello spazio operativo realizzi un determinato comportamento dinamico del robot, in funzione anche dei parametri di rigidezza e smorzamento impostati. La

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

cedevolezza del robot realizzata dal controllo consente l'adattamento del robot rispetto all'ambiente con cui è in contatto. Questo è possibile realizzarlo nel controllo ibrido solo se la geometria dell'ambiente e i relativi vincoli meccanici sono totalmente noti, in quanto il passaggio da controllo in posizione/velocità a controllo in forza per un determinato grado di libertà avviene in base a parametri logici.

La strategia così sviluppata è stata simulata attraverso il modello realizzato, in modo tale da verificarne l'effettivo funzionamento.

In particolare, si sono analizzate differenti possibilità per la definizione del nuovo set-point:

- definizione continua del set-point di controllo, aggiornando la relativa posizione e matrice di rotazione, ad ogni istante di campionamento, sulla base delle forze e delle coppie lette tramite le regole $\Delta X \propto F/K$ e $\Delta\theta \propto C/K$;
- definizione continua della matrice di rotazione del set-point di controllo, ad ogni istante di campionamento, sulla base delle coppie lette e definizione della posizione del set-point di controllo tramite la regola $\Delta X \propto F/K$, in condizione di equilibrio del sistema nelle direzioni traslazionali;
- definizione continua della matrice di rotazione del set-point di controllo, ad ogni istante di campionamento, sulla base delle coppie lette e definizione della posizione del set-point di controllo tramite la regola $\Delta X \propto \delta \cdot F^{\text{inf}}/K$, in condizione di equilibrio del sistema nelle direzioni traslazionali, dove δ è un coefficiente che modula l'entità dell'effettivo spostamento del set-point.

I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli relativi alla simulazione di esecuzione del task in cui il robot viene reso cedevole in tutti i suoi gradi di libertà, in modo tale da adattarsi all'ambiente con cui è in contatto. La posizione del set-point di controllo viene predefinita e rimane fissa in tutta l'esecuzione del task.

4.1 Caso base: robot soffice e set-point di controllo predefinito

4.1 Caso base: robot soffice e set-point di controllo predefinito

Tale tipologia di strategia elementare è applicabile solo se la geometria associata all'ambiente risulta completamente nota. Solo in questo caso, infatti, è possibile definire arbitrariamente e a monte dell'esecuzione del task una posizione funzionale del set-point di controllo, che consenta la realizzazione del compito desiderato. Le rigidzze associate ai gradi di libertà del sistema controllato nello spazio vengono rese molto cedevoli, in modo tale da garantire un adattamento del robot all'ambiente con cui è a contatto.

I parametri utilizzati per la simulazione del task risultano:

Rigidzze	
K_x [N/m]	200
K_y [N/m]	200
K_z [N/m]	200
K_α [Nm/rad]	20
K_β [Nm/rad]	20
K_γ [Nm/rad]	20

Tabella 4.3: rigidzze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.5
D_y	0.5
D_z	0.5
D_α	0.5
D_β	0.5
D_γ	0.5

Tabella 4.4: smorzamenti adimensionali impostati

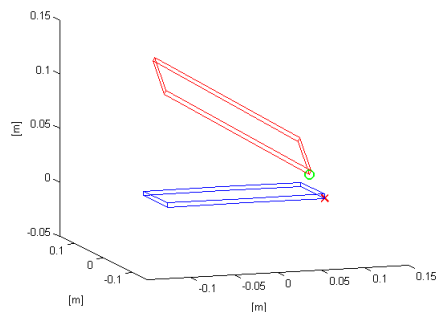


Figura 4.4: definizione della posizione del tool (pallino verde) e del set-point di controllo (croce rossa)

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

Il set-point di controllo predefinito viene posizionato in corrispondenza dell'angolo della sede relativo al primo vertice della geometria inserito (Figura 4.4). La relativa matrice di rotazione viene definita sulla base dell'orientamento della sede nello spazio.

L'impostazione dei parametri di controllo e la definizione del relativo set-point come sopra riportano portano ai risultati ottenuti dalla simulazione del task, in termini di andamenti dei gradi di libertà, visibili in Figura 4.5.

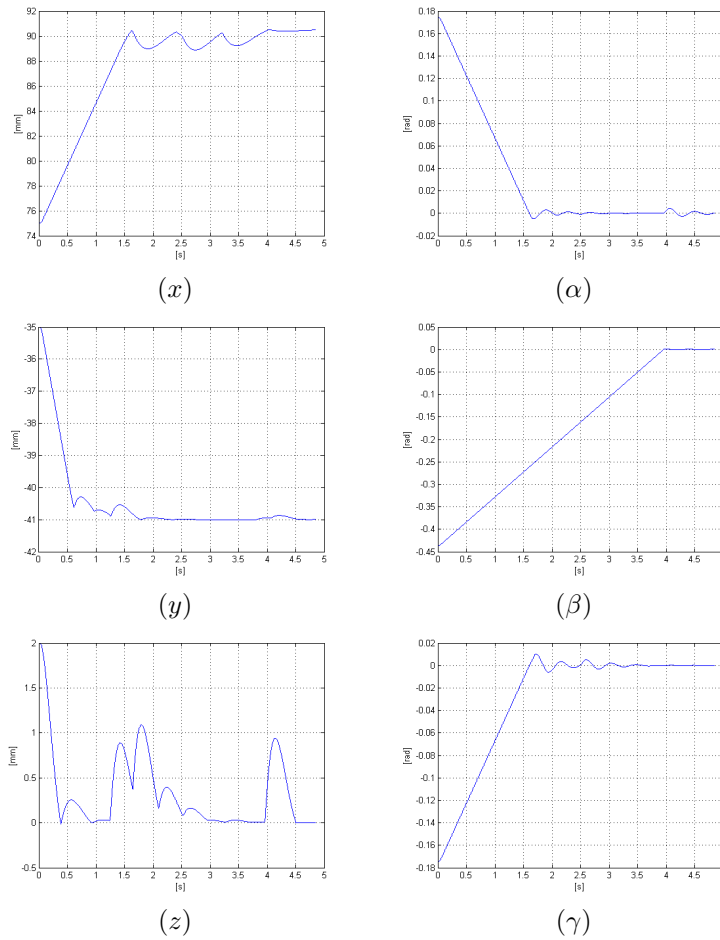


Figura 4.5: andamenti gradi di libertà ottenuti (comportamento soffice)

In particolare, analizzando il grafico relativo al grado di libertà Z è possibile notare un andamento a saltelli della geometria sulla superficie della sede dovuto al basso smorzamento. Il posizionamento del set-point di controllo sulla superficie della sede fa sì che quando la geometria entra in contatto con essa la lunghezza della molla in direzione Z sia nulla, e risulta conseguentemente nulla la relativa forza di richiamo. Essendo tali rigidità molto soffici, per piccoli spostamenti la forza di richiamo verso il set-point risulta piccola. In questo

4.1 Caso base: robot soffice e set-point di controllo predefinito

modo si ottengono saltelli di entità importanti, che possono rischiare di compromettere l'esecuzione del task nell'applicazione reale.

Analizzando i restanti gradi di libertà traslazionali si evince un comportamento del tutto simile a quello riscontrato per il grado di libertà Z al momento dell'urto della geometria nella direzione rispettivamente X ed Y.

Tale definizione del set-point di controllo non risulta quindi molto robusta in quanto i saltellamenti della geometria all'interno della sede assumono entità troppo elevate.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.6.

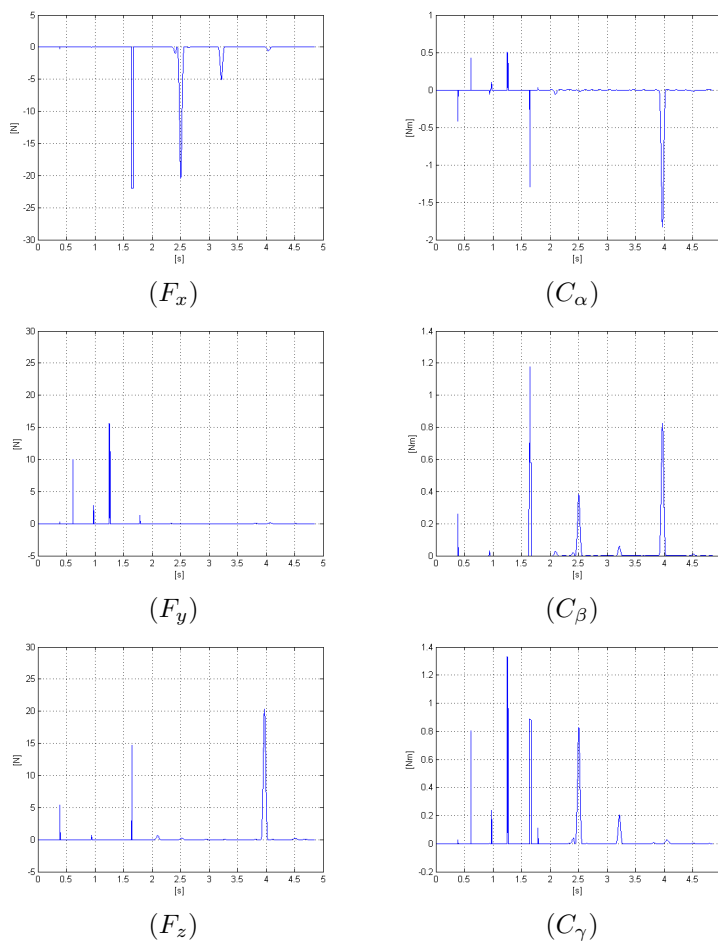


Figura 4.6: andamenti forze e coppie (comportamento soffice)

La strategia definita precedentemente è stata simulata portando il set-point di controllo in un punto dello spazio al di fuori della superficie della sede, in modo tale da generare un precarico sulle molle quando la geometria è a contatto con la sede (Figura 4.7).

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

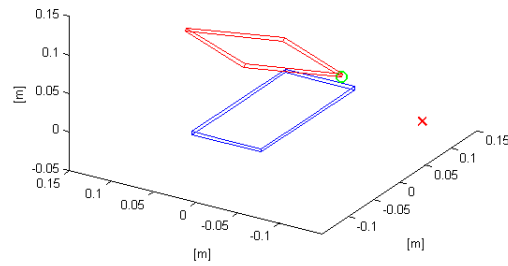


Figura 4.7: definizione della posizione del tool (pallino verde) e del set-point di controllo (croce rossa)

Dall'impostazione dei parametri di controllo e la definizione del relativo set-point si ottengono gli andamenti dei gradi di libertà visibili in Figura 4.8.

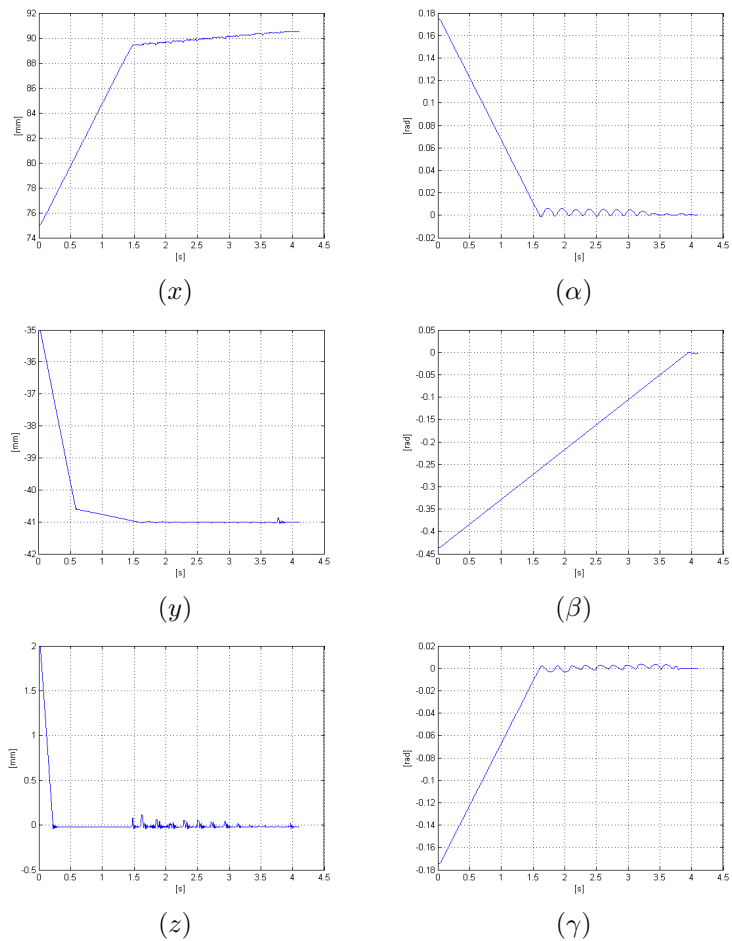


Figura 4.8: andamenti gradi di libertà (comportamento soffice)

4.1 Caso base: robot soffice e set-point di controllo predefinito

In particolare, è evidente una riduzione notevole dei saltellamenti della geometria sulla superficie della sede, anche se saltellamenti, pur di entità inferiore, rimangono presenti durante l'esecuzione del task. Questo può causare problemi durante l'esecuzione del task, soprattutto in presenza di difetti geometrici. Le azioni sviluppate dal contatto non sono in alcun modo sotto controllo. Irregolarità sono presenti anche nei gradi di libertà X ed Y, se pur di entità minore rispetto alla simulazione precedentemente analizzata.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.9.

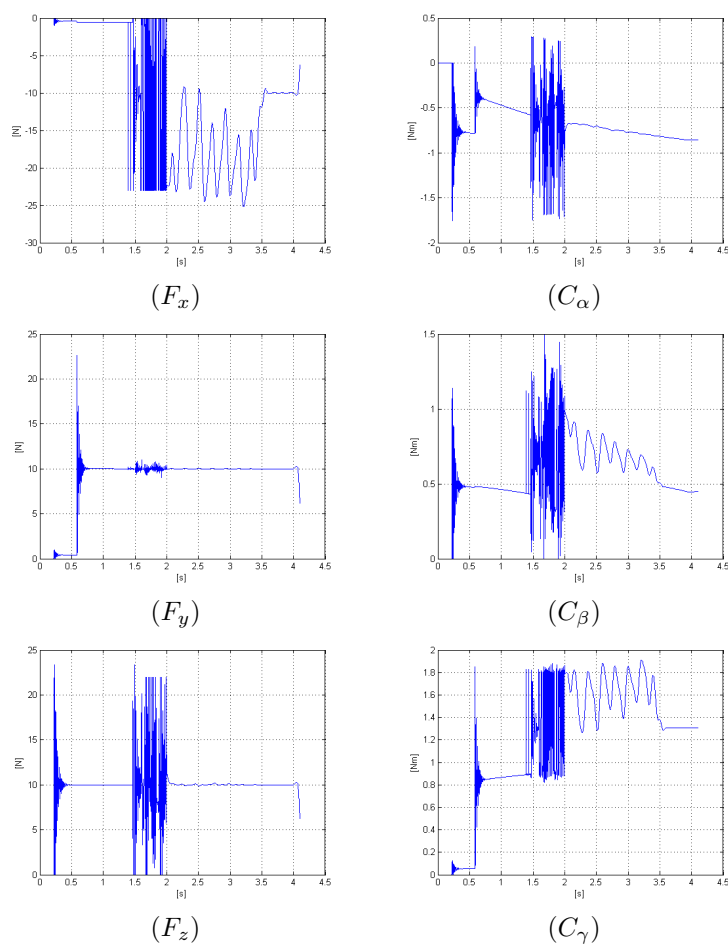


Figura 4.9: andamenti forze e coppie (comportamento soffice)

4.2 Aggiornamento continuo del set-point di controllo

Una prima strategia sviluppata prevede un aggiornamento continuo del set-point di controllo. L'aggiornamento viene eseguito ad ogni istante di campionamento, che corrisponde all'istante in cui la FRI effettua la lettura e la scrittura di dati tra pc remoto e controllore del robot.

L'aggiornamento del set-point di controllo avviene sulla base delle forze e delle coppie lette lato robot, le quali vengono stimate all'end-effector in un sistema di riferimento parallelo a quello fisso che identifica la tasca. In particolare, la strategia definita va a modulare il valore assoluto delle forze di interazione sulla base di un valore desiderato predefinito \mathbf{f}^0 . Questo permette di controllare l'interazione tra robot e ambiente, garantendo al contempo il contatto e mantenendo l'interazione su valori sostenibili per il robot. Inoltre, a causa di limitazioni sulle coppie erogate ai giunti, limitazioni imposte dal controllo implementato nativamente nel robot, si rende necessario introdurre una limitazione sull'entità della variazione di posizionamento del set-point di controllo. Questo in quanto, in funzione dell'interazione e in funzione dei parametri di controllo, la nuova posizione calcolata del set-point, durante la fase di esplorazione, può risultare troppo lontana dalla posizione attuale, richiedendo coppie troppo elevate ai giunti, che comportano un blocco d'emergenza del robot. Tale limitazione sulla variazione di posizione del set-point di controllo viene introdotta definendo una soglia massima per cui, se il modulo dello spostamento in una direzione supera tale valore, tale spostamento viene saturato al valore della soglia predefinita.

I parametri impostati per la simulazione del task risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1500
K_y [N/m]	1500
K_z [N/m]	1500
K_α [Nm/rad]	50
K_β [Nm/rad]	50
K_γ [Nm/rad]	50

Tabella 4.5: rigidezze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.5
D_y	0.5
D_z	0.5
D_α	0.5
D_β	0.5
D_γ	0.5

Tabella 4.6: smorzamenti adimensionali impostati

4.2 Aggiornamento continuo del set-point di controllo

I parametri di rigidezza sono stati impostati in modo tale da avere un sistema sufficientemente cedevole ma al contempo in grado di richiamare il sistema verso il set-point di controllo anche per piccole differenze di posizionamento. I parametri di smorzamento sono stati impostati in modo tale da avere un sistema sufficientemente smorzato.

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.10.

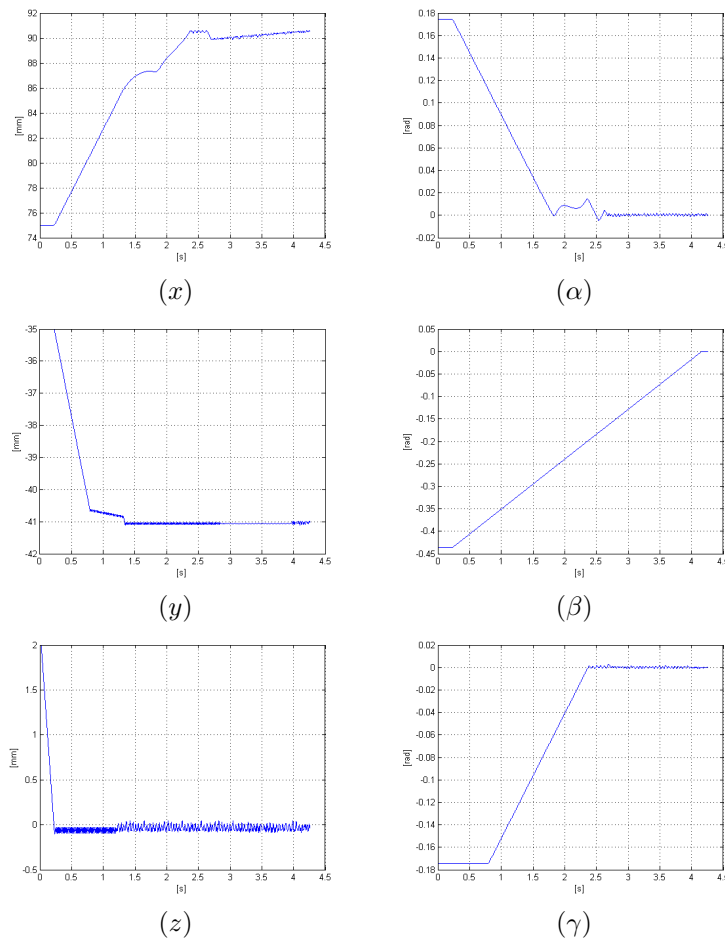


Figura 4.10: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento continuo del set-point

In particolare si evidenzia un andamento molto oscillante per i gradi di libertà in quanto, modificando il set-point ad ogni istante di acquisizione, non si tratta con un sistema all'equilibrio statico ma con un costantemente in transitorio. Questo fa sì che ad ogni ciclo di controllo le forze e le coppie lette risultino differenti in quanto non si lascia andare all'equilibrio il sistema. Notevoli problemi possono presentarsi nel caso in cui si instaurino urti di entità notevole tra robot

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

e ambiente. Questo potrebbe, pur considerando una saturazione sulla variazione di spostamento del set-point di controllo, compromettere l'esecuzione del task qualora la saturazione prefissata risulti troppo contenuta. In qualsiasi caso, con una strategia di questo tipo non si ottiene un'interazione costante tra robot e ambiente, ma un'interazione in continuo mutamento.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.11.

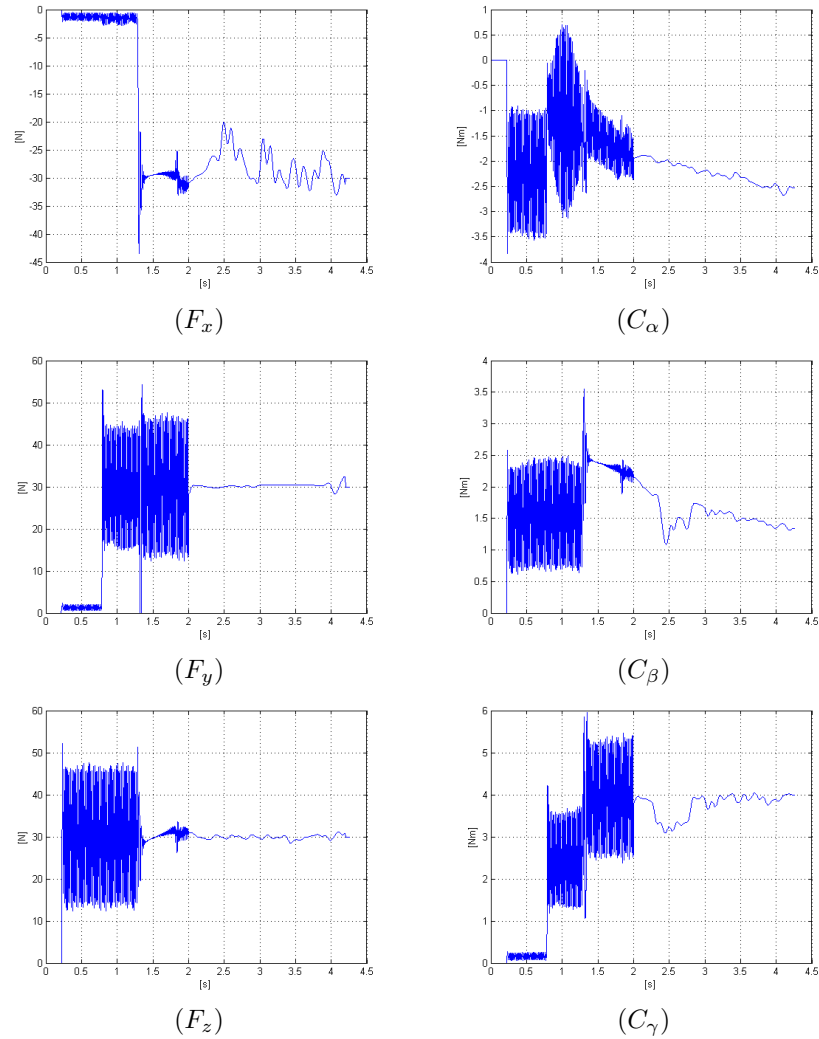


Figura 4.11: andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento continuo del set-point

Sull'andamento delle forze si ripercuote l'andamento oscillante del posizionamento del set-point.

4.2 Aggiornamento continuo del set-point di controllo

L'andamento delle componenti di posizione del set-point comandato sulla base della strategia sviluppata sono riportate in Figura 4.12, 4.13, 4.14.

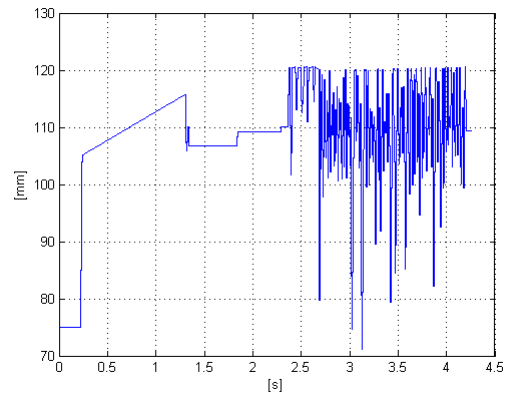


Figura 4.12: componente di spostamento lungo X del set-point comandato

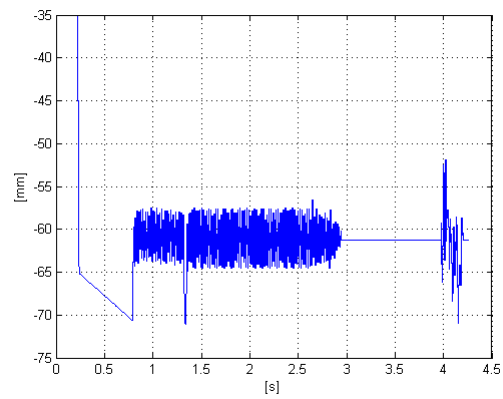


Figura 4.13: componente di spostamento lungo Y del set-point comandato

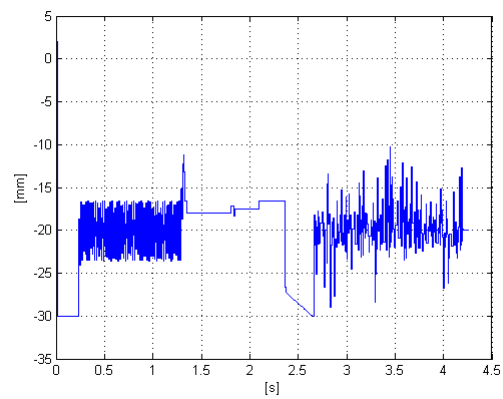


Figura 4.14: componente di spostamento lungo Z del set-point comandato

4.3 Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo

Dati i problemi dovuti ai transitori riscontrati nello spostamento continuo del set-point di controllo, è stata sviluppata una strategia che prevede l'aggiornamento della posizione del set-point di controllo solo quando il sistema controllato risulta in una condizione di equilibrio statico lungo le direzioni traslazionali. In questo modo la variazione di posizione del set-point di controllo non sarà influenzata dai transitori dovuti al contatto e restituirà un andamento delle forze di interazione instaurate più continuo, risultando in una stabilità al contatto maggiore.

Come la strategia precedente, la modifica della posizione del set-point di controllo avviene sulla base delle forze stimate all'end-effector, in modo tale da ottenere una forza di contatto di entità desiderata.

Due modalità di modifica della posizione del set-point sono state simulate:

- spostamento del set-point sulla base della variazione calcolata;
- spostamento del set-point sulla base della variazione calcolata, moltiplicando il risultato ottenuto per un coefficiente di attenuazione dello spostamento δ .

Si vuole in questo modo valutare un'eventuale influenza dell'entità dello spostamento del set-point sull'esecuzione del task.

4.3.1 Modifica posizione proporzionale a F/K

I parametri impostati per la simulazione del task risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1500
K_y [N/m]	1500
K_z [N/m]	1500
K_α [Nm/rad]	50
K_β [Nm/rad]	50
K_γ [Nm/rad]	50

Tabella 4.7: rigidezze impostate

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.15.

Rispetto alla strategia riportata in precedenza, si ottiene un andamento più pulito dei gradi di libertà del sistema durante l'esecuzione del task. La modifica della posizione del set-point durante le sole fasi di equilibrio del sistema consentono, infatti, di evitare continui aggiornamenti che risultano in gran parte frutto dei transitori dovuti al contatto con l'ambiente e che possono compromettere la riuscita dell'operazione.

4.3 Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo

Smorzamenti	
D_x	0.5
D_y	0.5
D_z	0.5
D_α	0.5
D_β	0.5
D_γ	0.5

Tabella 4.8: smorzamenti adimensionali impostati

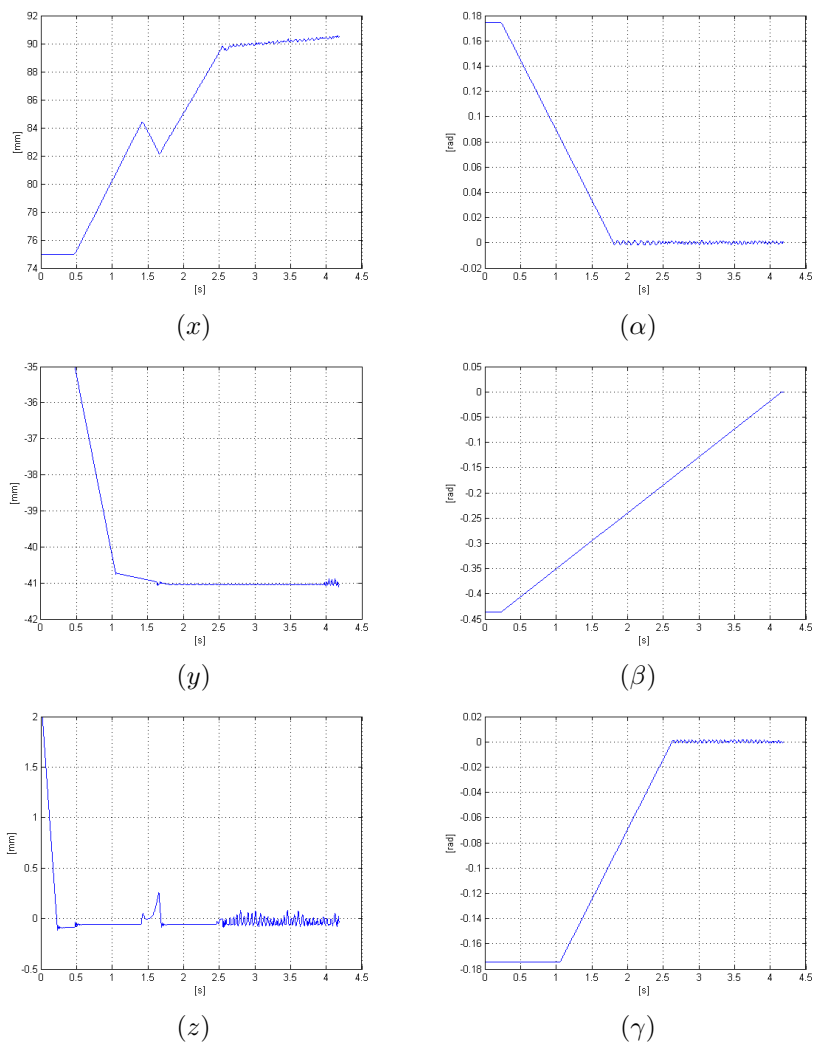


Figura 4.15: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 1$

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.16.

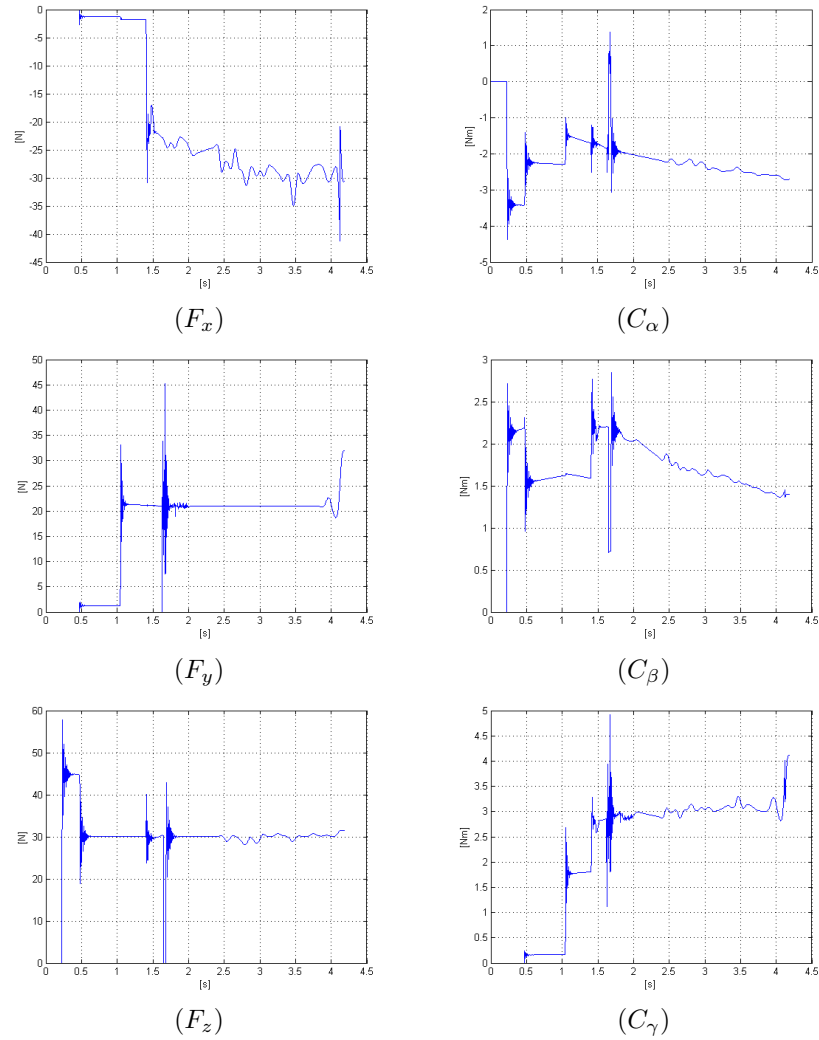


Figura 4.16: andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 1$

Le forze sviluppate durante l'esecuzione del task risultano caratterizzate da minori oscillazioni, proprio in funzione della modifica sull'aggiornamento della posizione del set-point di controllo.

4.3 Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo

L'andamento delle componenti di posizione del set-point comandato sulla base della strategia sviluppata sono riportate in Figura 4.17, 4.18, 4.19.

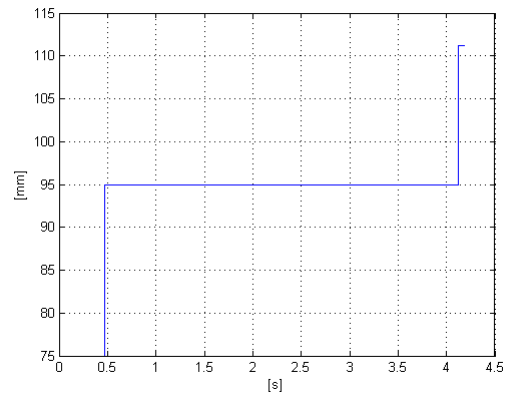


Figura 4.17: componente di spostamento lungo X del set-point comandato

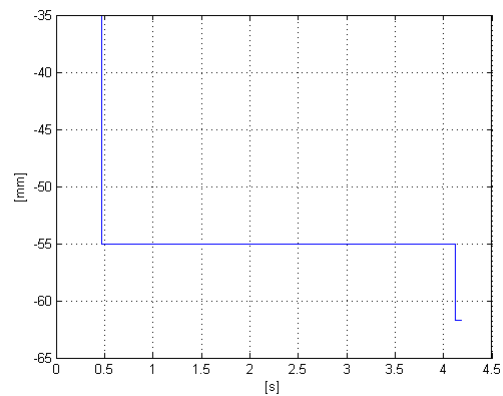


Figura 4.18: componente di spostamento lungo Y del set-point comandato

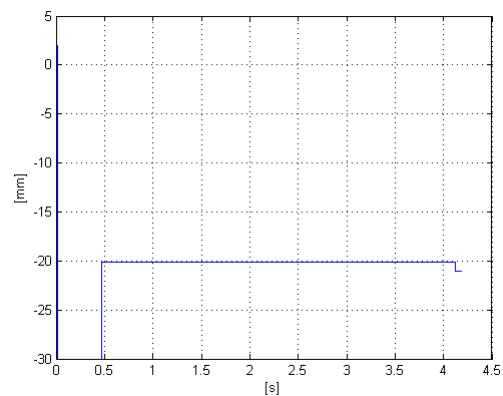


Figura 4.19: componente di spostamento lungo Z del set-point comandato

4.3.2 Modifica posizione proporzionale a $\delta \cdot F/K$

I parametri impostati per la simulazione del task risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1500
K_y [N/m]	1500
K_z [N/m]	1500
K_α [Nm/rad]	50
K_β [Nm/rad]	50
K_γ [Nm/rad]	50

Tabella 4.9: rigidezze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.5
D_y	0.5
D_z	0.5
D_α	0.5
D_β	0.5
D_γ	0.5

Tabella 4.10: smorzamenti adimensionali impostati

Il parametro δ in simulazione è stato impostato pari a 0.5.

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.20.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.21.

Dai grafici riportati emerge un comportamento analogo a quello ottenuto nella simulazione precedente, in cui il parametro δ risulta unitario.

L'andamento delle componenti di posizione del set-point comandato sulla base della strategia sviluppata sono riportate in Figura 4.22, 4.23, 4.24.

In particolare si evidenzia un numero maggiore di aggiornamenti del set-point di controllo. I valori associati alle singole componenti di spostamento del set-point di controllo sono coerenti con il valore di δ impostato. I valori finali ottenuti per le singole componenti di spostamento del set-point di controllo risultano concordi con quelli ottenuti per la precedente simulazione con δ unitario, risultando così in una spinta uniforme nelle tre direzioni X, Y, Z pari, entro le tolleranze impostate, ai valori di forza desiderati.

4.3 Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo

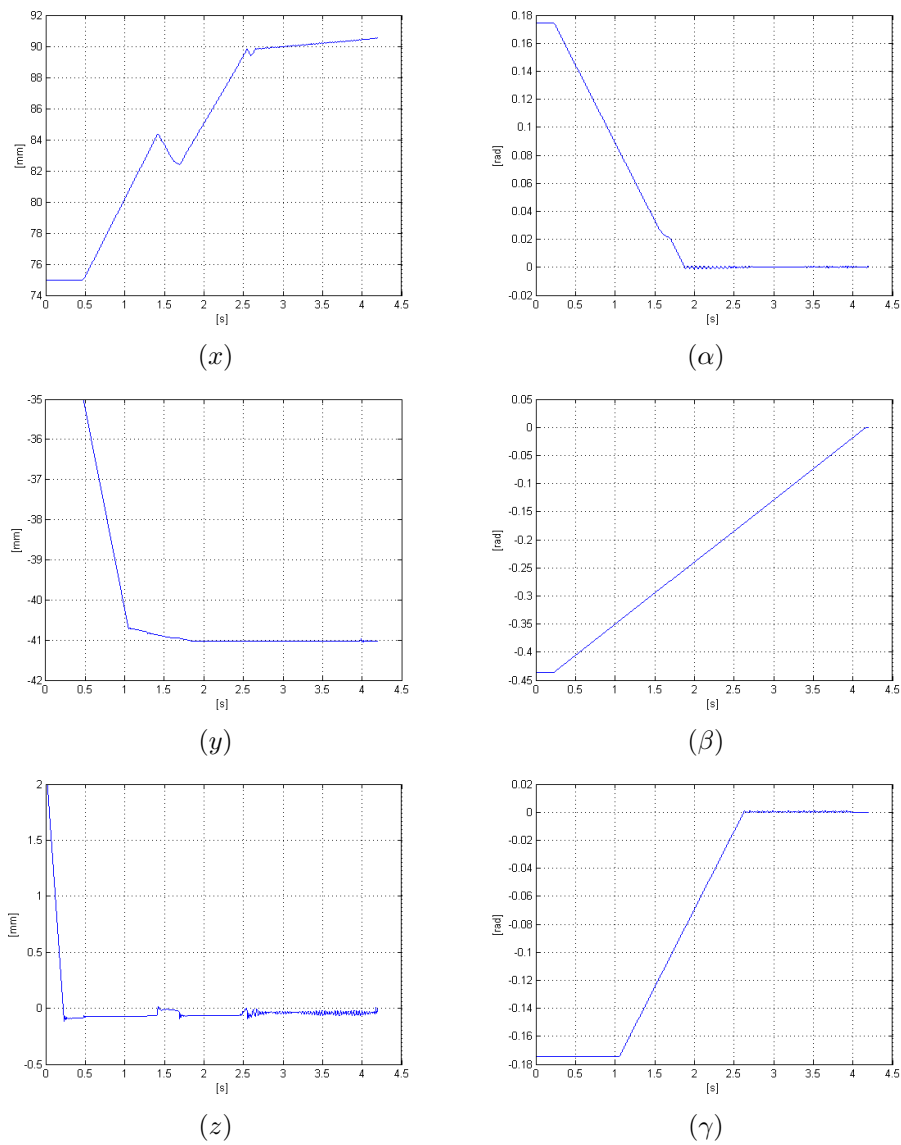


Figura 4.20: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 0.5$

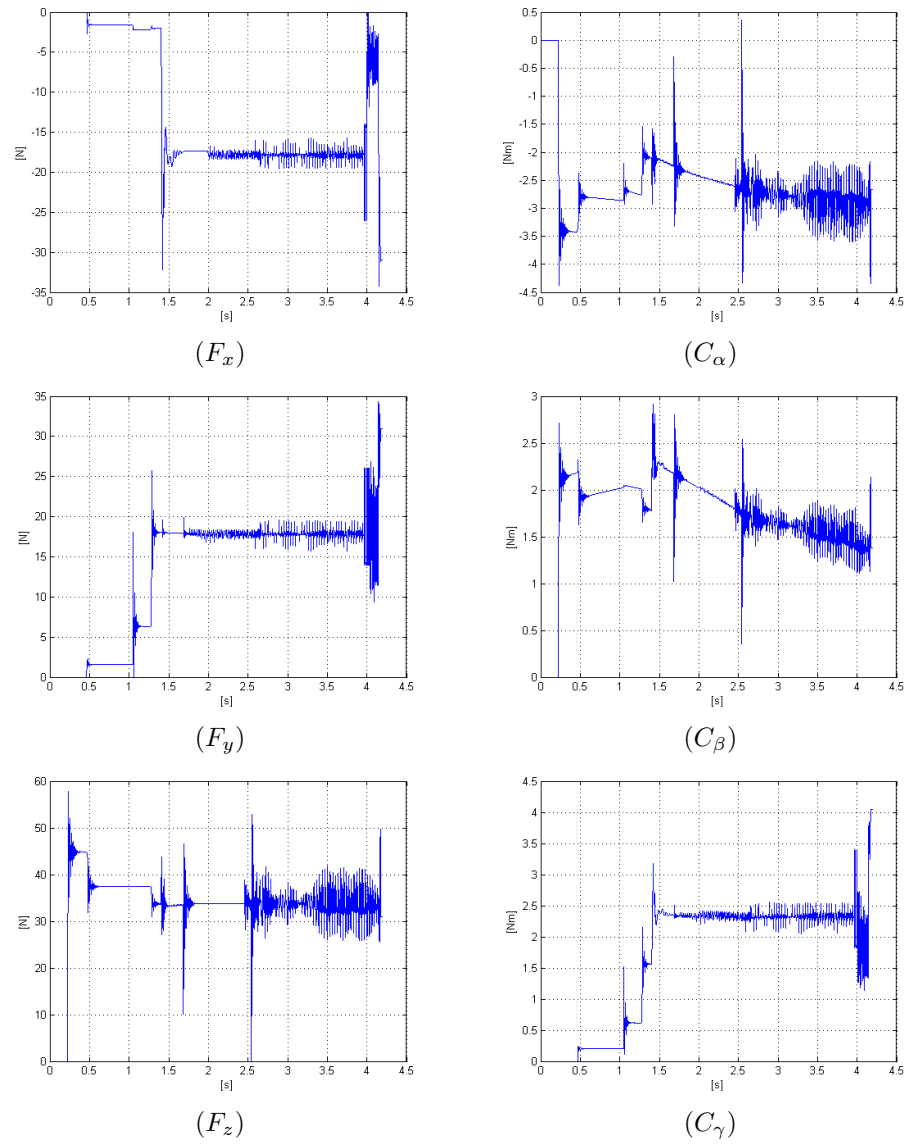


Figura 4.21: andamenti forze e coppie ottenuti dalla simulazione del comportamento relativo alla strategia di aggiornamento all'equilibrio del set-point, $\delta = 0.5$

4.3 Aggiornamento all'equilibrio del set-point di controllo

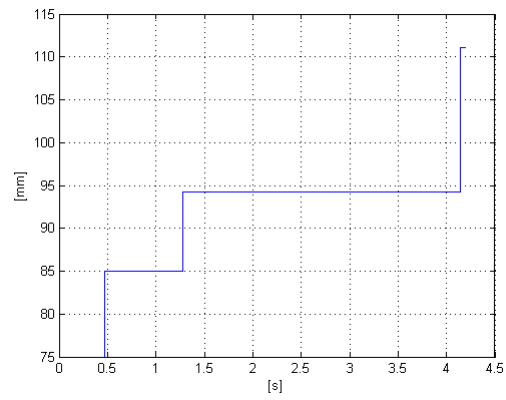


Figura 4.22: componente di spostamento lungo X del set-point comandato

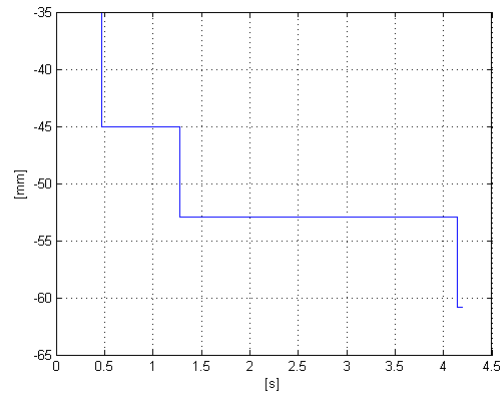


Figura 4.23: componente di spostamento lungo Y del set-point comandato

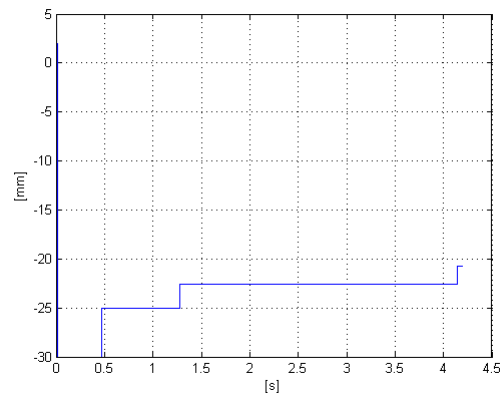


Figura 4.24: componente di spostamento lungo Z del set-point comandato

4.4 Risultati sperimentali

4.4.1 Strategia di spostamento continuo del set-point di controllo

La prima strategia implementata sul Kuka LWR è la strategia di aggiornamento continuo, ad ogni istante di campionamento, del set-point di controllo.

I parametri impostati per l'esecuzione dell'esperimento risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1500
K_y [N/m]	1500
K_z [N/m]	1500
K_α [Nm/rad]	50
K_β [Nm/rad]	50
K_γ [Nm/rad]	50

Tabella 4.11: rigidezze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.7
D_y	0.7
D_z	0.7
D_α	0.7
D_β	0.7
D_γ	0.7

Tabella 4.12: smorzamenti adimensionali impostati

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.25.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.26.

Avendo utilizzato un sistema maggiormente smorzato e velocità ridotte per garantire una esecuzione del task in sicurezza, è evidente come i picchi di forza associati ai contatti lungo le diverse direzioni siano contenuti rispetto a quanto ottenuto in simulazione. Tale diversità di comportamento è associata anche al passo di integrazione utilizzato in simulazione. Avvenuto il contatto, il sistema si comporta in modo simile a quanto evidenziato dalle simulazioni. Il set-point di controllo viene costantemente aggiornato e le forze esercitate nelle diverse direzioni tendono a portarsi ad un valore, in modulo, prossimo a quello desiderato (15 N, con tolleranza pari a ± 3 N). Non avendo elevati picchi di forza, le oscillazioni sulle diverse componenti del set-point di controllo sono limitate.

4.4 Risultati sperimentali

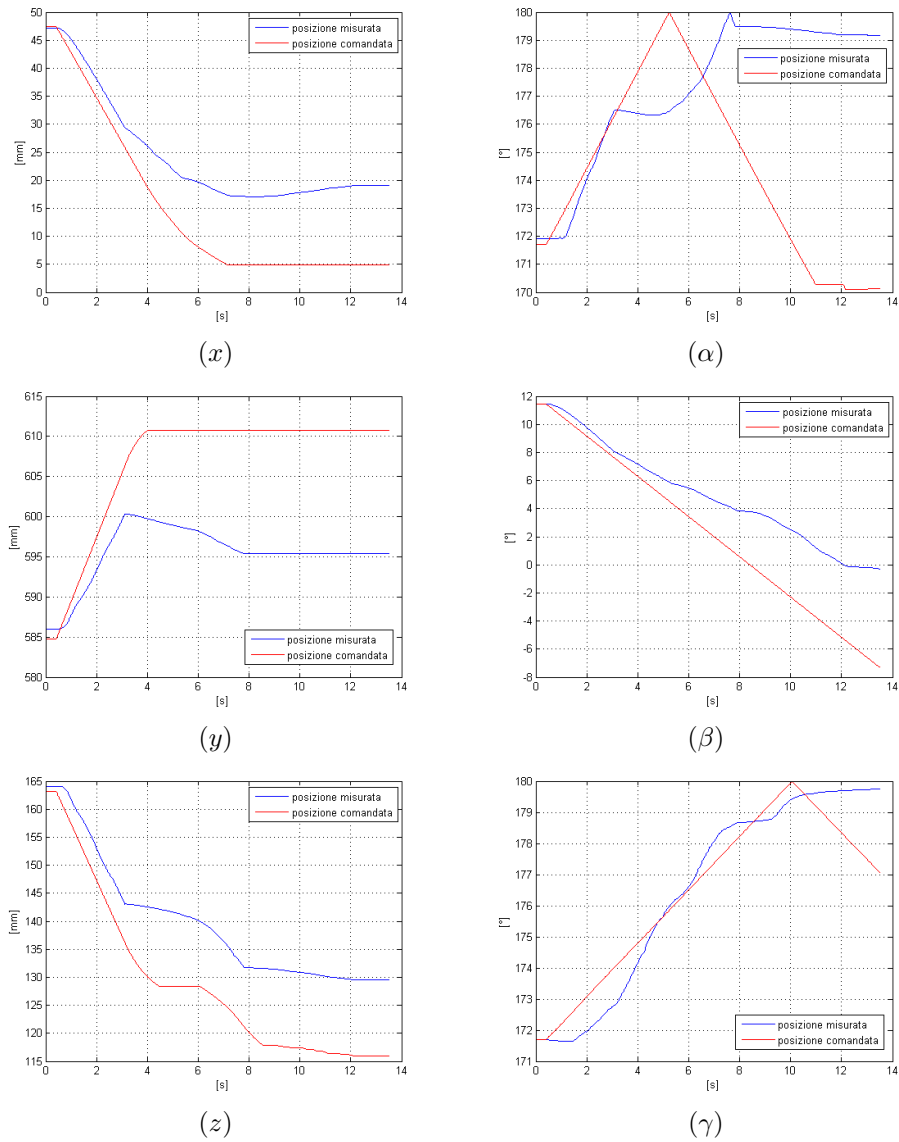


Figura 4.25: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point

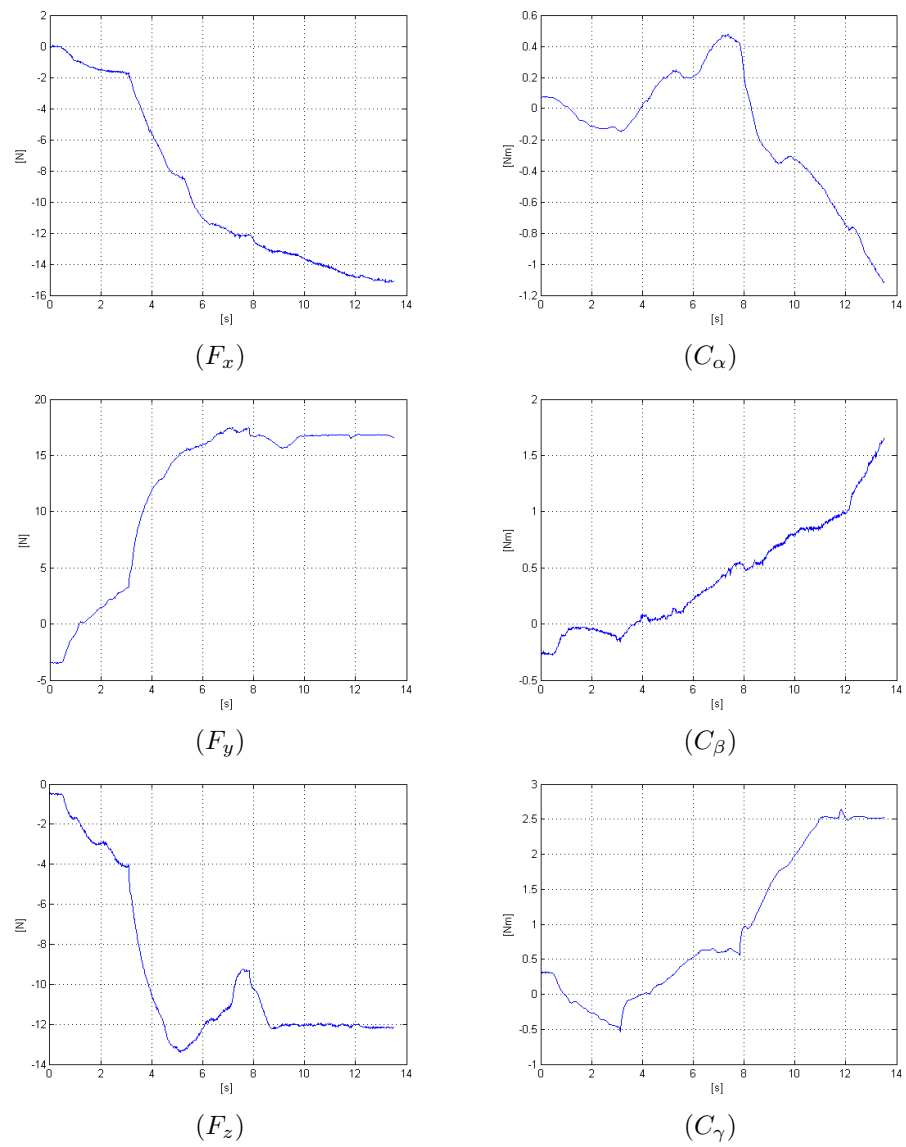


Figura 4.26: andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point

4.4 Risultati sperimentali

4.4.2 Strategia di spostamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale

La strategia implementata prevede una modifica delle componenti di posizione del set-point di controllo e, solo una volta che il sistema si trova all'equilibrio lungo le direzioni di traslazione, una modifica della relativa matrice di rotazione, in modo tale da far avvenire l'inserzione.

I parametri impostati per l'esecuzione dell'esperimento risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1500
K_y [N/m]	1500
K_z [N/m]	1500
K_α [Nm/rad]	50
K_β [Nm/rad]	50
K_γ [Nm/rad]	50

Tabella 4.13: rigidezze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.7
D_y	0.7
D_z	0.7
D_α	0.7
D_β	0.7
D_γ	0.7

Tabella 4.14: smorzamenti adimensionali impostati

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.27.

Da tali grafici è possibile osservare come i parametri comandati riferiti alle rotazioni rimangano costanti fino al raggiungimento dell'equilibrio lungo le direzioni di traslazione. Le rotazioni misurate subiscono delle modifiche a causa dell'instaurarsi dei contatti durante l'esecuzione del task. Ciò avviene a causa della cedevolezza realizzata dal controllo su tali gradi di libertà. Le componenti del set-point associate ai gradi di libertà traslazionali vengono continuamente aggiornate in modo che il robot eserciti delle forze in tali direzioni di entità pari a quelle desiderate, entro i limiti imposti dalle tolleranze.

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.28.

Da tali grafici è possibile osservare come le forze crescano portandosi su valori entro il range definito dalla strategia di controllo.

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

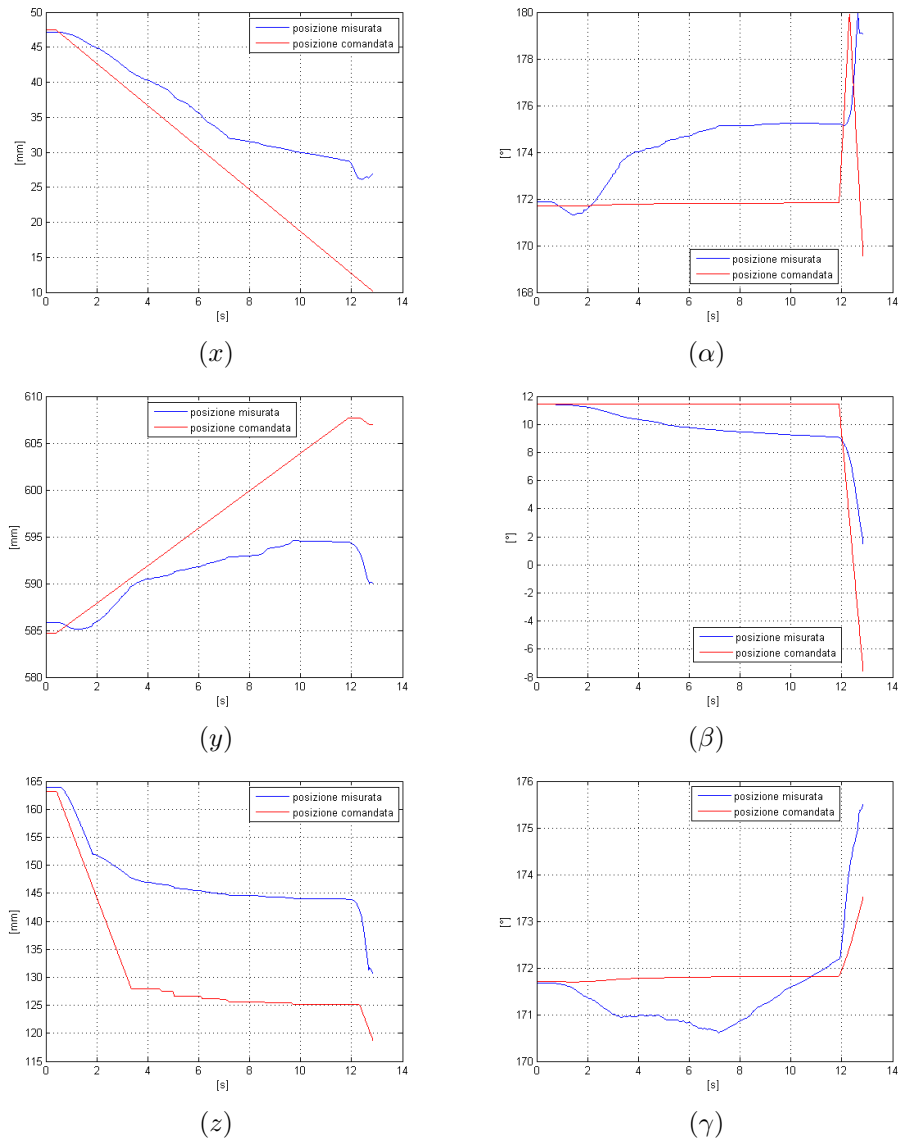


Figura 4.27: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale

4.4 Risultati sperimentali

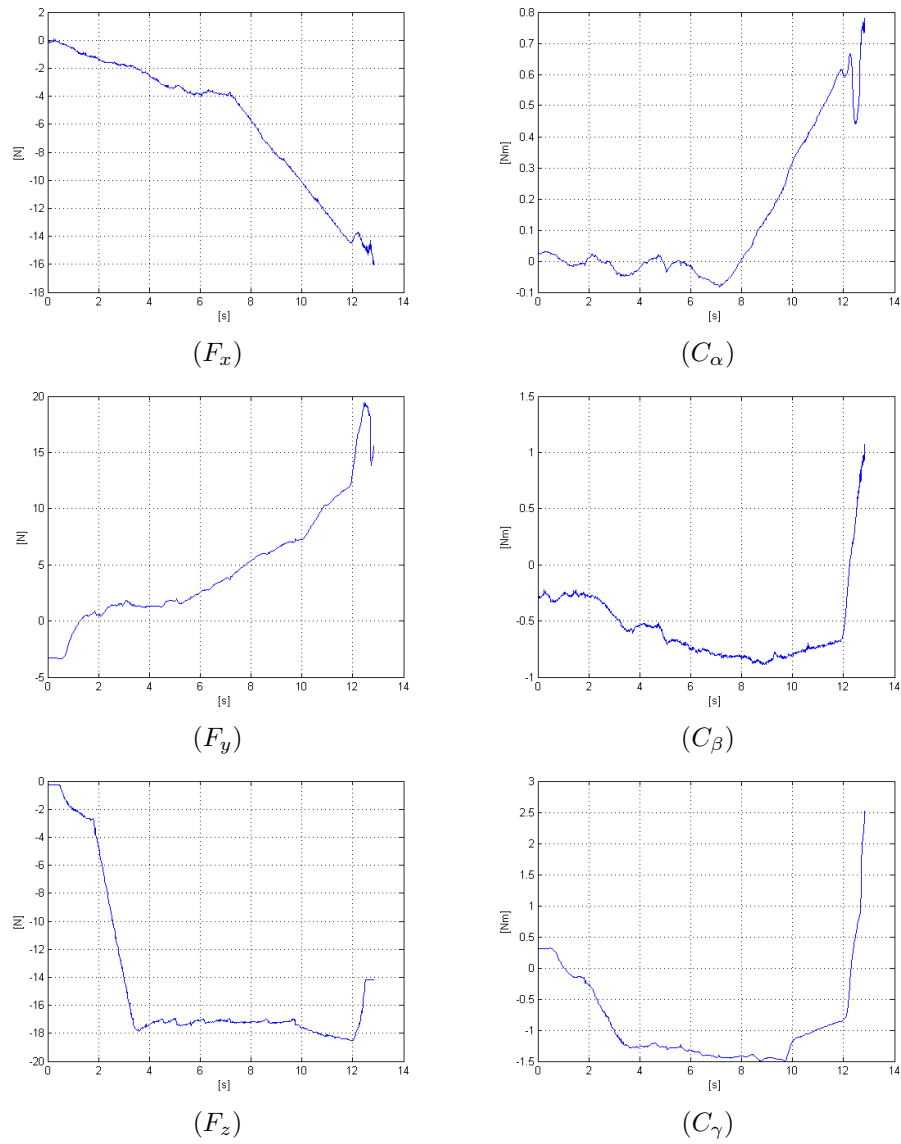


Figura 4.28: andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento del set-point di controllo all'equilibrio traslazionale

4.5 Applicazione della strategia a una geometria

La strategia di spostamento continuo del set-point di controllo è stata applicata, per verificarne la generalità di applicazione, ad una geometria del tipo riportato in Figura 4.29.



Figura 4.29: geometria utilizzata per la realizzazione del task di inserzione per la verifica della generalità di applicazione della strategia

I parametri impostati per l'esecuzione dell'esperimento risultano:

Rigidezze	
K_x [N/m]	1200
K_y [N/m]	1200
K_z [N/m]	1200
K_α [Nm/rad]	70
K_β [Nm/rad]	70
K_γ [Nm/rad]	70

Tabella 4.15: rigidezze impostate

Smorzamenti	
D_x	0.7
D_y	0.7
D_z	0.7
D_α	0.7
D_β	0.7
D_γ	0.7

Tabella 4.16: smorzamenti adimensionali impostati

4.5 Applicazione della strategia a una geometria

Gli andamenti dei gradi di libertà del sistema ottenuti dalla simulazione sono riportati in Figura 4.30.

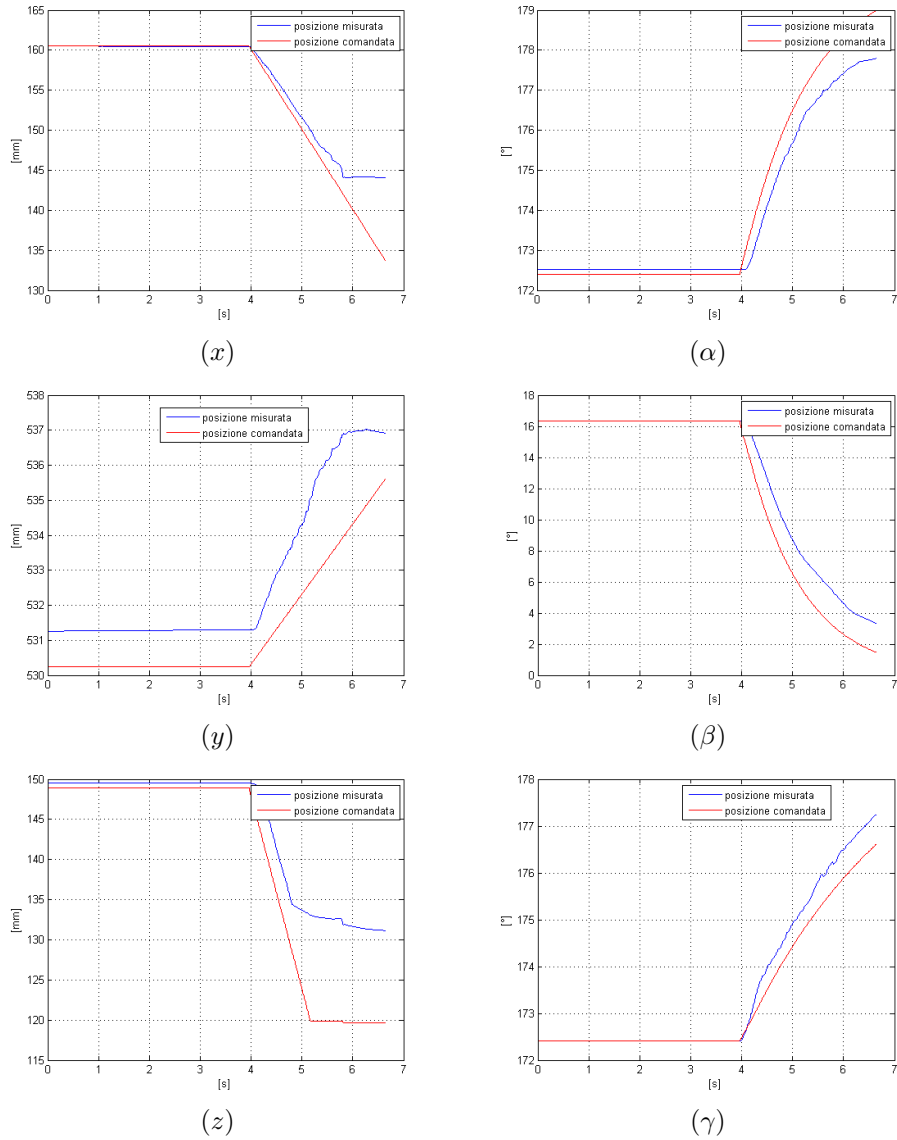


Figura 4.30: andamenti gradi di libertà ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point, manipolando la nuova geometria

Strategia di configurazione adattativa dei parametri di controllo

Le forze e le coppie riportate all'end-effector sono visibili in Figura 4.31. L'inserimento della differente geometria manipolata è stata eseguita con successo. Dai grafici delle forze è visibile come la strategia di controllo realizza le forze desiderate nelle diverse direzioni, entro le tolleranze definite.

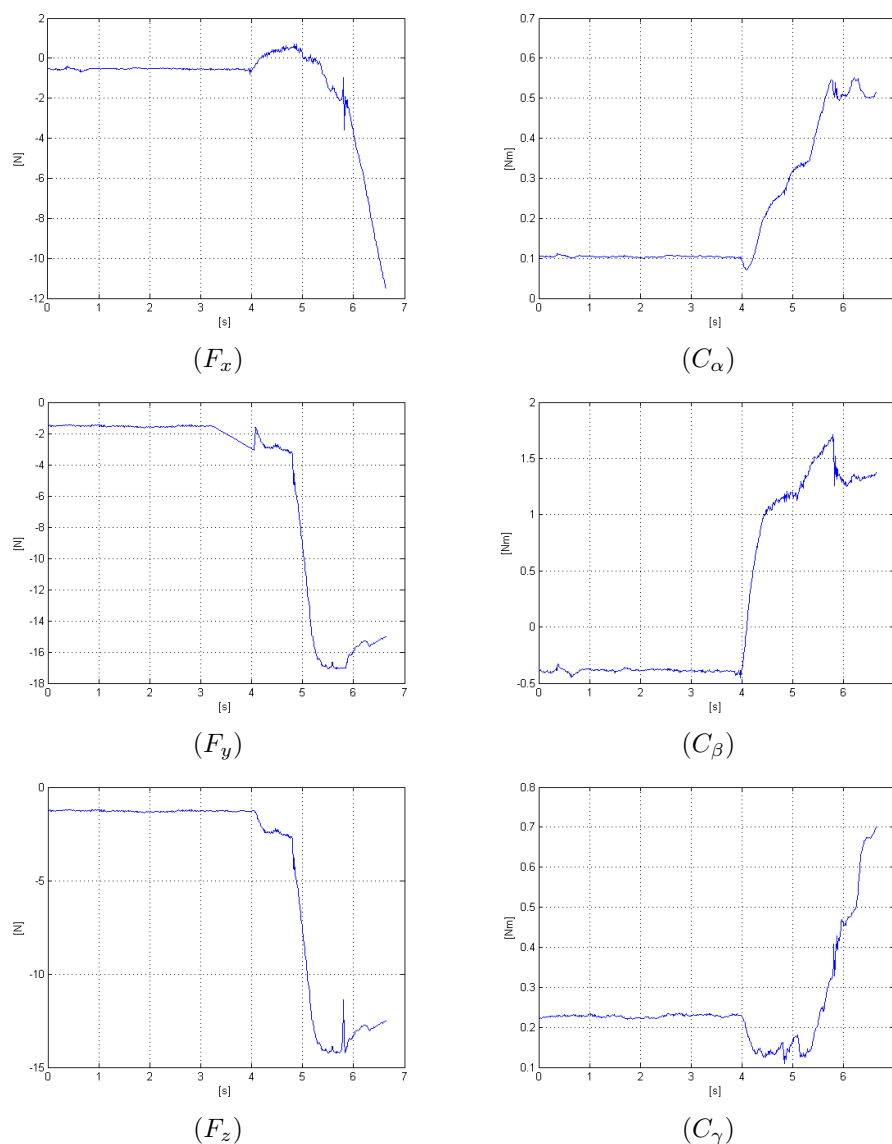


Figura 4.31: andamenti forze e coppie ottenuti dalla implementazione della strategia di aggiornamento continuo del set-point, manipolando la nuova geometria

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto ha avuto l'obiettivo di determinare una strategia che consenta una configurazione adattativa dei parametri di controllo durante l'esecuzione di un determinato task, in modo tale da permettere al robot di adattare il suo comportamento dinamico in funzione dell'interazione instaurata con l'ambiente con cui è a contatto.

Per fare questo, si è reso necessario lo sviluppo di un modello del sistema robot controllato-ambiente. Tale modello ha permesso di valutare l'interazione locale instaurata dal contatto, sulla base della quale sviluppare le strategie descritte nel capitolo precedente.

La trattazione generale sviluppata consente, relativamente alla metodologia di modellazione e utilizzo della funzione di trasferimento forze/posizioni del robot controllato, l'estensione dei risultati ad un qualsiasi task, apportando, laddove necessario, modifiche sulla strategia e sui relativi parametri e sulla caratterizzazione del modello in relazione alla configurazione assunta nello svolgimento del task.

Le strategie così sviluppate consentono di operare con ambienti (parzialmente) non noti, di cui né la geometria, né le relative caratteristiche meccaniche vengono modellate. Il vantaggio di disporre di una strategia di questo tipo è il fatto di non dover strutturare il task off-line, definendo riferimenti o azioni predefinite, e il fatto di avere una flessibilità di esecuzione dei task maggiore. In questo modo, diversi task possono essere eseguiti con la stessa logica, pur trattando geometrie, ambienti o operazioni diverse. Le strategie illustrate consentono, infatti, di realizzare un determinato comportamento dinamico del sistema controllato, demandando al controllore l'aggiornamento locale dei parametri di controllo.

I risultati ottenuti aprono nuovi scenari di applicazione del lavoro sviluppato.

Ad esempio, la definizione di un modello del sistema controllato consente la simulazione del comportamento dinamico del robot in contatto con un ambiente soffice o caratterizzato da una rigidità variabile in funzione della profondità di penetrazione (quale, ad esempio, la pelle o la gomma o tessuti biologici relativamente soffici), oppure la simulazione del comportamento dinamico di più robot in cooperazione, controllati in impedenza nello spazio operativo.

In questo modo, è possibile estendere e ridefinire le strategie di configurazione adattativa dei parametri di controllo sviluppate, in modo tale da soddisfare i

Conclusioni e sviluppi futuri

requisiti richiesti dalle sopra citate applicazioni. In particolare, è possibile introdurre, oltre ai termini di forza e coppia già considerati, termini di posizione e velocità in modo tale da migliorare le performance del sistema controllato.

Bibliografia

- [1] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, Wimböck, and G. Hirzinger. The dlr lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot: An International Journal*, 34:376–385, 2007.
- [2] A. Albu-Schäffer, C. Ott, and G. Hirzinger. A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots - part ii: full state feedback, impedance design and experiments. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2666–2672, 2004.
- [3] Alin Albu-Schäffer, Christian Ott, and Gerd Hirzinger. A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1):23–39, 2007.
- [4] Chae H. An and John M. Hollerbach. Dynamic stability issues in force control of manipulators. In *American Control Conference, 1987*, pages 821–827, 1987.
- [5] J. K. Davidson and K. H. Hunt. *Robot and Screw Theory*. Oxford University Press, 2004.
- [6] S. Eppinger and W. Seering. On dynamic models of robot force control. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 29–34, April 1986.
- [7] S. Eppinger and W. Seering. Introduction to dynamic models for robot force control. *Control Systems Magazine, IEEE*, 7(2):48–52, April 1987.
- [8] S. Eppinger and W. Seering. Understanding bandwidth limitations in robot force control. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 904–909, March 1987.
- [9] P. B. Goldsmith, B. A. Francis, and Goldenberg A. A. Stability of hybrid position/force control applied to manipulators with flexible joints. *Int. Journal of Robotics and Automation*, 14(4):89–99, 1999.
- [10] G. Hirzinger, A. Albu-Schäffer, M. Hahnle, I. Schaefer, and N. Sporer. On a new generation of torque controlled light-weight robots. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3356–3363, 2001.

-
- [11] Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation. In *American Control Conference, 1984*, pages 304–313, 1984.
- [12] Neville Hogan. Impedance control - an approach to manipulation. I - theory. II - implementation. III - applications. *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control B*, 107:1–24, 1985.
- [13] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(1):43–53, 1987.
- [14] A. Kugi, C. Ott, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger. On the passivity-based impedance control of flexible joint robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(2):416–429, 2008.
- [15] Leslie Lamport. *L^AT_EX. A Document Preparation System*. Addison-Wesley, 1994.
- [16] Matthew T. Mason. Compliance and force control for computer controlled manipulators. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 11(6):418–432, 1981.
- [17] C. Ott, A. Albu-Schaffer, A. Kugi, S. Stamigioli, and G. Hirzinger. A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots - part i: torque feedback and gravity compensation. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2659–2665, 2004.
- [18] M. H. Raibert and J. J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103(2):126–133, 1981.
- [19] Brian Rooks. The harmonious robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 33:125–130, 2006.
- [20] J. Roy and L.L. Whitcomb. Adaptive force control of position/velocity controlled robots: theory and experiment. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(2):121–137, April 2002.
- [21] J. Kenneth Salisbury. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates. In *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on*, volume 19, pages 95–100, 1980.
- [22] J. Kenneth Salisbury and John J. Craig. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *The International Journal of Robotics Research*, 1(1):4–17, 1982.
- [23] K. Salisbury, W. Townsend, B. Ebrman, and D. DiPietro. Preliminary design of a whole-arm manipulation system (wams). In *Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 254–260, April 1988.

BIBLIOGRAFIA

- [24] Günter Schreiber, Andreas Stemmer, and Rainer Bischoff. Icrá 2010 workshop on innovative robot control architectures for demanding (research) applications. In *Innovative Robot Control Architectures for Demanding (Research) Applications*, volume 1, pages 15–21, 2010.
- [25] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano. *Robotica industriale*. McGraw-Hill, 1995.
- [26] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [27] A. Stemmer, A. Albu-Schaffer, and G. Hirzinger. An analytical method for the planning of robust assembly tasks of complex shaped planar parts. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 317–323, april 2007.
- [28] Stefano Stramigioli. *Modeling and IPC Control of Interactive Mechanical Systems: A Coordinate-Free Approach*. Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
- [29] W. T. Townsend and J. K. Salisbury. Mechanical design for whole-arm manipulation. In Paolo Dario, G. Sandini, and P. Aebischer, editors, *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?*, pages 153–164. Springer-Verlag New York, Inc., 1993.
- [30] Daniel E. Whitney. Historical perspective and state of the art in robot force control. *The International Journal of Robotics Research*, 6(1):3–14, 1987.
- [31] T. Yoshikawa. Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—description of hand constraints and calculation of joint driving force. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(5):386–392, 1987.
- [32] T. Yoshikawa. *Foundations of Robotics: Analysis and Control*. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
- [33] T. Yoshikawa. Force control of robot manipulators. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 220–226, 2000.
- [34] Tsuneo Yoshikawa and Akio Sudou. Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators: On-line estimation of unknown constraint. In Vincent Hayward and Oussama Khatib, editors, *Experimental Robotics I*, volume 139 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 116–134. Springer Berlin / Heidelberg, 1990.