## POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

# Modellazione e *fault detection* di giochi in robot collaborativi

Relatore: **Prof. Massimo Sorli** 

Correlatori: Prof. Stefano Mauro Ph.D. Andrea De Martin Ing. Andrea Raviola Candidato: Domenico Fabio Migliore

Anno Accademico 2020/2021

#### Abstract

I sistemi di *Prognostics and Health Management* stanno assumendo crescente importanza in molte applicazioni ingegneristiche, permettendo l'individuazione dei guasti incipienti e la determinazione della vita utile residua dell'entità oggetto di studio.

L'implementazione di tale tecnologia nel campo della robotica industriale è fortemente ostacolata dalla limitatezza dei dati storici relativi a robot operanti in condizioni non nominali, necessari per l'allenamento di modelli *data-driven* sufficientemente accurati.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di creare un modello matematico *high-fidelity* che permetta di simulare l'effetto che *fault* e *failure*, di diversa natura ed entità, hanno sul comportamento del robot e di creare il dataset di cui si necessita per il suddetto allenamento. In particolare, lo studio è incentrato sulla modellazione e sull'analisi degli effetti del gioco che si determina nei giunti robotici a causa dell'usura del riduttore. Tale fenomeno comporta errori nel posizionamento del *Tool Center Point* del manipolatore compromettendo l'esito della mansione assegnata e, nel caso di robotica collaborativa, l'incolumità del personale con cui viene condivisa l'area di lavoro.

Al fine di estrarre degli indicatori di salute che permettano di rilevare il gioco nel riduttore, stimandone l'entità, si sono effettuate svariate simulazioni di applicazioni di *pick-and-place*, in diverse condizioni operative. Per evitare incrementi di costi, complessità del *setup*, pesi ed ingombri, dovuti all'introduzione di sensori aggiuntivi, le *feature* analizzate sono ottenute sfruttando esclusivamente i segnali estraibili dal robot.

Questa trattazione, pur avendo validità generale, è stata realizzata considerando come caso studio il robot collaborativo UR5, prodotto da Universal Robots, presente all'interno del laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino. Questo è stato modellato tramite il software MATLAB/Simulink, facendo uso dell'ambiente Simscape Multibody per rappresentarne la dinamica.

## Indice

Elenco Elenco		o delle figure o delle tabelle	
1	Intr	oduzione	1
	1.1	Strategie di manutenzione	3
		1.1.1 Manutenzione correttiva	4
		1.1.2 Manutenzione preventiva	4
		1.1.3 Manutenzione su condizione	5
	1.2	Classificazione dei guasti	7
		1.2.1 Classificazione in base all'entità del guasto	7
		1.2.2 Classificazione in base all'impatto del guasto	7
		1.2.3 Classificazione in base alla vita del dispositivo	8
<b>2</b>	Dese	rizione del robot UR5	10
	2.1	Unità di controllo	11
	2.2	Teach pendant	13
	2.3	Braccio robotico	14
		2.3.1 Azionamenti	17
		2.3.2 Riduttori	20
		2.3.3 Sensori	22
3	Dese	rizione del modello del robot UR5	23
	3.1	Logica di controllo	31
		3.1.1 Modello di prima approssimazione	31
		3.1.2 Modello di dettaglio	32
	3.2	Elettronica di potenza	38
		3.2.1 Modello di prima approssimazione	40
		3.2.2 Modello di dettaglio	40

### Indice

	3.3	Aziona	amento elettrico	42
		3.3.1	Modello di prima approssimazione	43
		3.3.2	Modello di dettaglio	45
		3.3.3	Parametri elettrici e meccanici	53
	3.4	Ridut	tore armonico	56
		3.4.1	Modello di attrito	58
		3.4.2	Modello di degrado	65
	3.5	Dinan	nica	67
	3.6	Sensor	ri	74
		3.6.1	Modello di dettaglio	78
	mor 4.1 4.2	nico Descri Analis	zione delle traiettorie	<b>79</b> 81 85
5	Rile	evazior	ne del gioco	92
-	5.1	Featu	re selection	94
		5.1.1	Individuazione delle <i>feature</i>	98
		5.1.2	Valutazione delle <i>feature</i>	102
	5.2	Fault	detection	111
6	Con	clusio	ni e sviluppi futuri	116
A	Tra	iettori	e di pick-and-place	119
Bi	bliog	grafia		136

## Elenco delle figure

1.1	Curva a vasca da bagno [1]. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	9
2.1	Unità di controllo [2]	12
2.2	Teach Pendant del robot UR5	13
2.3	Nomenclatura dei giunti del robot UR5.	15
2.4	Spazio di lavoro del robot UR5 [3]	16
2.5	Schema di convertitore elettronico di potenza.	19
2.6	Componenti di un harmonic drive.	21
3.1	Modello del robot UR5 in ambiente Simulink.	24
3.2	Schema funzionale di un attuatore elettromeccanico	25
3.3	Braccio robotico con estensione pari al $100\%$ (a), $66\%$ (b) e $33\%$ (c) dell'estensione massima.	28
3.4	Tempi e angoli di arresto del giunto di spalla al variare della velocità con pavload ed estensione pari al 33%, 66% e 100%.	30
3.5	Logica di controllo in retroazione di posizione, velocità e cor-	30
3.6	Generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento in assi trifase $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ e nel sistema di riferimento in assi di statore $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$	52
3.7	[4]	33
	riferimento in assi di statore $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ .	34
3.8	Proiezione dei fasori in assi $\vec{\alpha}, \beta$ sugli assi $\vec{d}, \vec{q}$ considerando	
	l'allineamento tra l'asse $\vec{\alpha}$ e l'asse $d$ (a sinistra) e tra l'asse $\vec{\alpha}$	
	e l'asse $\vec{q}$ (a destra) [5]	34
3.9	Andamento temporale di una generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento in assi trifase $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ e nel sistema di	
	riferimento in assi di statore $\vec{d}$ $\vec{a}$	36
3.10	Schema logico del servosistema elettromeccanico in controllo	00
3.10	posizione con motore BLAC	37
		51

3.11	Esempio di un segnale PWM con duty cycle pari al $25\%$	38
3.12	Esempio di modulazione tramite tecnica PWM bipolare	39
3.13	Modello Simulink del convertitore DC-DC	40
3.14	Schema di un inverter trifase comandato in PWM	41
3.15	Modello Simulink dell'inverter trifase	42
3.16	Struttura di un motore sincrono a magneti permanenti [6].	43
3.17	Modello del motore in corrente continua del primo giunto.	43
3.18	Schema a blocchi del motore sincrono a magneti permanenti.	46
3.19	Schema a blocchi per la determinazione delle correnti di fase.	47
3.20	Giunto Size 3 smontato dal robot UR5	49
3.21	Geometria approssimata dell'alloggiamento del motore elettrico.	50
3.22	Schema a blocchi per il calcolo della temperatura degli avvol-	
	gimenti.	53
3.23	Confronto tra gli azionamenti delle serie KBM e TBM [7].	55
3.24	Backlash tra due ruote dentate [8]	57
3.25	Posizioni relative dei denti della ruota motrice (M) e della	
	ruota condotta (C)	58
3.26	Andamento del coefficiente di attrito viscoso nei sei giunti	
	dell'UR5 in funzione della temperatura	59
3.27	Andamento del coefficiente di attrito coulombiano nei sei giun-	
	ti dell'UR5 in funzione della temperatura.	60
3.28	Generico andamento della curva di Stribeck [9]	61
3.29	Andamento della coppia di attrito $(T_f)$ in funzione della ve-	
	locità angolare nel sesto giunto ( $\omega$ ).	62
3.30	Schema a blocchi del modello di attrito.	64
3.31	Schema degli angoli caratteristici del contatto tra denti in un	
	riduttore armonico.	67
3.32	Rappresentazione 3D del robot UR5 in ambiente Simscape	
	Multibody	68
3.33	Schema del collegamento tra due link di un manipolatore [10].	70
3.34	Schema a blocchi del modello dinamico del robot UR5	73
3.35	Schema a blocchi del primo giunto	74
3.36	Risposta in frequenza del sensore di corrente	75
3.37	Risposta in frequenza del sensore di velocità	76
3.38	Risposta in frequenza del sensore di posizione	76
3.39	Modello Simulink del sensore di velocità del primo giunto.	78
3.40	Modello trifase del sensore di corrente	78
4.1	Usura della dentatura del <i>Flex Spline</i>	81
4.2	Distribuzione e distribuzione normale della temperatura ester-	
	na e del <i>payload</i> .	83
	- v	

4.3	Andamento temporale delle coordinate del TCP per la traiet-	
	toria #2	85
4.4	Andamento della coppia trasmessa al giunto di spalla in pre-	
	senza di un backlash pari a 0,1° per la traiettoria #2	86
4.5	Andamento della corrente di quadratura del giunto di spalla	
	con <i>backlash</i> pari a $0,1^{\circ} \in 0^{\circ}$ per la traiettoria #2	86
4.6	Confronto tra l'andamento della velocità angolare del giunto	
	di spalla con severity pari a $0\%$ e $100\%$ per la traiettoria #2.	87
4.7	Esempio della diversa azione della forza di gravità sul giunto	
	di spalla	88
4.8	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #2 con	
	backlash pari a 0.05° e 0.1°	89
4.9	Sistema di riferimento solidale alla base del robot [11].	90
4.10	Errori degli angoli di <i>roll. pitch</i> e <i>uaw</i> per <i>backlash</i> pari a	
	$0.05^{\circ} e 0.1^{\circ} per la trajettoria #2$	91
5.1	Schema della fase online di un sistema CBM/PHM	94
5.2	Piramide DIKW.	95
5.3	Confronto dell'andamento della corrente di quadratura per	
	tre diversi gradi di <i>severity</i> del guasto nel giunto di spalla per	
	la traiettoria #2	97
5.4	Distribuzione dei valori delle <i>feature</i> in funzione della <i>severity</i>	
	del guasto per la traiettoria $#2. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	99
5.5	Confronto tra gli andamenti della corrente $i_q$ con severity pari	
	0% e 25% per la traiettoria #2	100
5.6	Distribuzione dei valori delle <i>feature</i> modificate al variare	
	della <i>severity</i> del guasto per la traiettoria $#2. \ldots \ldots$	101
5.7	Andamento della divergenza di Kullback-Leibler delle feature	
	analizzate per la traiettoria #2. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	103
5.8	Distribuzione assunta dalla feature $f_4$ per severity pari a 0%	
	e 25% per la traiettoria #3	110
5.9	Andamento della POD, della POFA, della specificità e dell'ac-	
	curatezza al variare della soglia discriminante per la feature	
	$f_4$ in riferimento alla traiettoria #3	110
5.10	ROC curve (a sinistra) e success function (a destra) della	
	feature $f_4$	111
5.11	Evoluzione del gioco e della <i>feature</i> $f_4$ nel corso della vita	
	operativa del riduttore armonico.	113
5.12	Risultati grafici ottenuti tramite l'algoritmo di fault detection	
	utilizzando la <i>feature</i> $f_4$ , con riferimento alla traiettoria #2.	114

5.13	Confronto tra i risultati grafici ottenuti tramite l'algoritmo di fault detection tra la feature $f_4$ e la differenza della posizione	
	angolare, con riferimento alla traiettoria #2	114
A.1	Waypoint interessati nella traiettoria #1	120
A.2	Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria $\#1$	121
A.3	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria $\#1$ con	
	backlash pari a 0,05° e 0,1°	121
A.4	Waypoint interessati nella traiettoria #2	122
A.5	Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria $#2$	123
A.6	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria $#2$ con	
	backlash pari a 0,05° e 0,1°	123
A.7	Waypoint interessati nella traiettoria #3	124
A.8	Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria #3	125
A.9	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria $#3$ con	
	backlash pari a 0,05° e 0,1°	125
A.10	Waypoint interessati nella traiettoria #4	126
A.11	Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria $#4$	127
A.12	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria $#4$ con	
	backlash pari a 0,05° e 0,1°	127
A.13	Waypoint interessati nella traiettoria #5	128
A.14	Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria $\#5$	129
A.15	Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #5 con	
	backlash pari a 0,05° e 0,1°	129
	• / /	

## Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche principali robot UR CB-Series [12]	10
2.2	Specifiche tecniche dell'unità di controllo dell'UR5 [13]	12
2.3	Specifiche tecniche del braccio robotico [13]	17
2.4	Coppie dei giunti in base alla taglia [14].	20
3.1	Valori di velocità, payload e posizione angolare dei sei giunti	
	del braccio robotico considerati nella campagna sperimentale	
	per la determinazione dei tempi e degli angoli di arresto	28
3.2	Tempi e angoli di arresto dei primi tre giunti con velocità,	
	payload ed estensione massima	29
3.3	Grandezze caratteristiche motori DC [15]	44
3.4	Grandezze necessarie per il calcolo della capacità termica degli	
	avvolgimenti.	50
3.5	Grandezze relative alla capacità termica dell'housing	51
3.6	Grandezze relative alla conduttanza termica tra gli avvolgi-	
	menti e il carter.	52
3.7	Grandezze relative alla conduttanza termica tra il carter e	
	l'ambiente esterno.	52
3.8	Valori della coppia continua e di picco erogata dai giunti Size	
	0 e Size 4	54
3.9	Motori candidati appartenenti alle serie KBM e TBM	54
3.10	Grandezze caratteristiche motore TBM 7615-A.	56
3.11	Parametri di D-H del robot UR5.	70
3.12	Massa e coordinate del centro di massa dei link del robot UR5.	71
4.1	Durate traiettorie simulate.	82
5.1	Feature per l'individuazione dei picchi nel segnale di corrente.	98
5.2	<i>Feature</i> per l'individuazione dei picchi nel segnale di corrente	
	modificate per evitare la sovrapposizione degli istogrammi. 1	.00
5.3	Coefficienti di correlazione di Pearson tra le <i>feature</i> e il guasto.1	05

### Elenco delle tabelle

<ul> <li>al 25% per ogni traiettoria</li></ul>	5.4	Signal-to-Noise Ratio, espresso in dB, per una severity pari	
<ul> <li>5.5 Signal-to-Noise Ratio, espresso in dB, per una severity pari al 25% per ogni traiettoria</li></ul>		al 25% per ogni traiettoria	105
<ul> <li>al 25% per ogni traiettoria</li></ul>	5.5	Signal-to-Noise Ratio, espresso in dB, per una severity pari	
<ul> <li>5.6 Signal-to-Noise Ratio, espresso in dB, medio di tutti i livelli di degrado per ogni traiettoria</li></ul>		al 25% per ogni traiettoria	106
<ul> <li>di degrado per ogni traiettoria</li></ul>	5.6	Signal-to-Noise Ratio, espresso in dB, medio di tutti i livelli	
<ul> <li>5.7 Matrice di decisione [16].</li> <li>5.8 Metriche delle <i>feature</i> relative alla traiettoria #3, per un livello di usura pari al 25%.</li> </ul>		di degrado per ogni traiettoria.	106
5.8 Metriche delle <i>feature</i> relative alla traiettoria $\#3$ , per un livello di usura pari al 25%	5.7	Matrice di decisione [16]. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	107
livello di usura pari al $25\%$	5.8	Metriche delle <i>feature</i> relative alla traiettoria $#3$ , per un	
		livello di usura pari al $25\%$	109

## Elenco degli acronimi

A/D	Analogico/Digitale
AC	Alternating Current
AUC	Area Under the Curve
BLAC	BrushLess Alternating Current
BLDC	BrushLess Direct Current
$\mathbf{CBM}$	Condition Based Maintenance
$\mathbf{CNC}$	Computerized Numerical Control
$\mathbf{DC}$	Direct Current
D-H	Denavit-Hartenberg
DIKW	Data Information Knowledge Wisdom
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
$\mathbf{FPR}$	False Positive Rate
$\mathbf{GUI}$	Graphical User Interface
i.i.d.	identically and independently distributed
<b>IFR</b> International Federation of Robotics	
ITC	Information and Communication Technology
$\mathbf{KL}$	Kullback Leibler
MES	Maintenance Engineer System
MTBF	Mean Time Between Failure
$\mathbf{PDF}$	Probability Density Function
$\mathbf{PHM}$	Prognostic and Health Management
$\mathbf{PSMS}$	Permanent Magnet Synchronous Motor
POD	Probability Of Detection
POFA	Probability Of False Alarm
$\mathbf{PWM}$	Pulse Width Modulation
ROC	Receiver Operator Characteristic
$\mathbf{RPN}$	Risk Priority Number
$\operatorname{RUL}$	Remaining Useful Life
SIR	Sampling Importance Resampling
SIS	Sequential Importance Sampling
SMC	Sequential Monte Carlo

- **SNR** Signal-to-Noise Ratio
- **TCP** Tool Center Point
- **TNR** True Negative Rate
- **TOC** Total Ownership Cost
- **TPR** True Positive Rate

# Capitolo 1 Introduzione

Il piano *Industrie 4.0*, varato dal governo tedesco nel 2011, ha segnato l'inizio di un sostanziale e progressivo cambiamento delle metodologie di lavoro in campo industriale, mirando ad incrementare le prestazioni degli impianti produttivi e ad assicurare la sostenibilità della produzione stessa.

Uno dei volani della quarta rivoluzione industriale è rappresentato dal crescente grado di automazione ottenuto tramite l'introduzione della robotica all'interno dei processi produttivi. Sono svariate le ragioni che spingono le aziende ad investire in questa tecnologia: crescita della produttività, maggior sicurezza dei lavoratori, riduzione degli scarti, maggiore ripetitività, riduzione dei *work-in-progress*, riduzione dei costi [17].

Inizialmente l'uso dei robot era limitato allo svolgimento di operazioni all'interno di gabbie protettive in cui potevano entrare solo i lavoratori autorizzati a seguito dello spegnimento della macchina [18]. Negli ultimi anni del decennio scorso è stata introdotta una nuova tipologia di robot che può essere installato senza recinzioni protettive, così da permettere la collaborazione con gli operatori condividendo lo spazio di lavoro [19]. Da allora, i *cobot* (contrazione di *collaborative robot*) si sono diffusi rapidamente in svariati settori produttivi.

Affinché un robot possa operare in prossimità dell'uomo è necessario garantire la sicurezza di quest'ultimo. A tale fine, essi vengono realizzati con materiali leggeri, geometrie arrotondate e sono caratterizzati da velocità e forze massime limitate [17]. Vi sono pure soluzioni in cui i robot, essendo in grado di percepire la presenza dell'uomo, rallentano i propri movimenti fino ad arrestarsi quando l'operatore si avvicina, per poi ripartire autonomamente a seguito dell'allontanamento di quest'ultimo. È bene sottolineare che il concetto di collaboratività non è limitato soltanto al cobot, ma deve interessare tutto l'ambiente in cui esso opera. In altri termini, l'operazione svolta dal robot, anche in funzione dei tool utilizzati, deve garantire l'incolumità delle persone che operano nelle sue prossimità.

Considerata l'importanza assunta da tale tecnologia, un'adeguata gestione della manutenzione può risultare strategica al fine di ottenere dei buoni risultati di impresa. Inoltre, non essendoci barriere protettive tra gli operatori e i cobot, l'adozione di sistemi di manutenzione predittiva permette di ridurre il rischio che un comportamento non nominale del robot possa arrecare danno al personale.

Nell'ottica dell'Industria 4.0, i sistemi di Information and Communication Technology (ICT) stanno assumendo crescente importanza nell'attività di manutenzione, sia in termini gestionali che operativi. Sistemi software chiamati MES (Maintenance Engineering System) permettono di effettuare analisi ingegneristiche sul miglioramento della manutenzione in forma automatica o semiautomatica [20, 21, 22, 23, 24]. Dopo aver acquisito e trasmesso i dati di interesse, grazie a tali sistemi, è possibile giungere all'identificazione della necessità di intervento e alla schedulazione dello stesso. In altri termini, questi sistemi informatici consentono di effettuare operazioni di diagnostica e prognostica e, quindi, di prevedere lo stato di usura e l'evoluzione della probabilità di guasto [25].

Nel campo della robotica l'ostacolo più grande da superare, nell'implementazione di tali sistemi di manutenzione, è rappresentato dalla scarsità dei dati necessari per l'analisi dello stato di salute del robot tramite modelli *data-driven*. Tali algoritmi, infatti, per poter fornire buoni risultati devono essere allenati sfruttando un'ampia mole di dati provenienti da robot che funzionino sia in condizioni nominali che in presenza di anomalie.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di sopperire alla carenza di dati sfruttando un modello matematico che permetta di simulare il funzionamento di un robot e gli effetti che i guasti hanno su di esso. Effettuando un gran numero di simulazioni in diverse condizioni operative è possibile creare un *database* utilizzabile per addestrare i modelli sopracitati.

Come caso studio si è considerato il robot UR5, prodotto dall'azienda Universal Robots, presente nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino.

Coerentemente con quanto riportato in [26], un robot è costituito da vari sottosistemi e, pertanto, un suo malfunzionamento può essere imputabile ad una o più avarie in ognuno di essi. In questa trattazione ci si concentrerà esclusivamente sui guasti che interessano i giunti, tralasciando quelli dei *link* e dell'unità di controllo, molto rari nella pratica industriale, nonché quelli dovuti a collisioni o errori umani, evitabili installando e utilizzando la macchina in modo opportuno. I giunti si costituiscono di cinque sistemi principali: l'elettronica, i sensori, il motore elettrico, i cuscinetti e il riduttore. In generale, i guasti nei componenti elettrici/elettronici sono facilmente rilevabili dall'unità di controllo, determinando uno scostamento dei segnali attesi. Quando questo supera determinate soglie critiche il robot si arresta per ragioni di sicurezza. Al contrario, i malfunzionamenti di natura meccanica tendono ad essere compensati dalla logica di controllo e, quindi, sono difficilmente rilevabili nei loro stadi iniziali. Ad esempio, l'usura dei cuscinetti, manifestandosi tramite un incremento della forza d'attrito, viene compensata da tensioni di alimentazione dell'azionamento maggiori. In letteratura sono riportate numerose metodologie per l'identificazione dello stato di salute dei cuscinetti ai fini prognostici, generalmente basate sull'analisi delle vibrazioni [27, 28]. Per tale ragione, in questa trattazione ci si concentrerà sullo studio degli effetti dell'usura del riduttore armonico.

E bene sottolineare che l'analisi di seguito riportata non prevede l'utilizzo di sensori esterni al robot. Pertanto, si terrà conto soltanto degli effetti che il degrado di cui sopra ha sulle grandezze misurate dai sensori installati dalla casa costruttrice all'interno del braccio robotico. Tale scelta è stata dettata sia da ragioni di natura economica, che dalla volontà di rendere la presente trattazione di carattere generale, applicabile anche a robot diversi da quello utilizzato come caso studio. Infatti, i dati estraibili dall'UR5, in assenza di sensori addizionali, sono analoghi a quelli forniti dai robot prodotti dalle altre case costruttrici.

## 1.1 Strategie di manutenzione

In tutte le attività in cui si fa uso di macchinari è necessario definire dei piani manutentivi per assicurarne il corretto funzionamento. L'obiettivo preposto è quello di evitare che usura e obsolescenza provochino il decadimento dell'efficienza del sistema, minando la continuità di servizio.

Nel corso degli anni il concetto di manutenzione industriale ha subito una sostanziale variazione di paradigma. Mentre in passato gli interventi di manutenzione erano volti al ripristino dell'operatività del macchinario a seguito di un guasto, oggigiorno si punta sempre più a prevenire che il guasto si manifesti, nell'ottica di ridurre i fermi macchina così da aumentare l'efficienza della produzione [29].

Ogni macchina viene progettata e costruita per svolgere una certa funzione, in determinate condizioni operative e per un fissato intervallo di tempo, denominato tempo di missione. Durante il suo funzionamento la macchina è soggetta a dei cicli caratterizzati da periodi di funzionamento e periodi di guasto. Compito della manutenzione è quello di redigere un piano che consenta una gestione ottimale dei fermi macchina [30].

Coerentemente con quanto riportato in [12], in campo industriale è possibile individuare tre diverse strategie di manutenzione:

- manutenzione correttiva;
- manutenzione preventiva;
- manutenzione su condizione.

#### 1.1.1 Manutenzione correttiva

Tale strategia di manutenzione è definita in [31] come "manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un'avaria e volta a riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta".

Fino all'avvento delle macchine CNC (*Computerized Numerical Control*) la manutenzione veniva eseguita prevalentemente adottando questo approccio. Oggigiorno però, una tale politica, in molti contesti industriali, non è più accettabile.

Considerata la semplicità di gestione, è opportuno adottare una manutenzione di tipo correttivo solo per componenti non critici, ovvero la cui avaria non comporta fermi nella produzione, mentre è fortemente sconsigliata in situazioni diverse per via dei seguenti svantaggi [32]:

- il guasto, presentandosi in maniera imprevista, comporta fermi macchina non programmati;
- non programmando a priori gli interventi di manutenzione, si necessita di un magazzino di grandi dimensioni per far fronte ai diversi guasti che possono manifestarsi o, altrimenti, è necessario prolungare il fermo macchina in modo da poter reperire i componenti da sostituire;
- il guasto di un componente può determinare, a sua volta, ulteriori danni gravando sui costi e sulle tempistiche necessari per effettuare la riparazione;
- è necessario avere una squadra di manutentori sempre disponibile.

#### 1.1.2 Manutenzione preventiva

In [31] si asserisce che la manutenzione preventiva è *"eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità* 

di guasto o la degradazione del funzionamento di un'entità". Schedulando le attività di manutenzione, è possibile ridurre l'impatto che il fermo macchina ha sulla produzione. Inoltre, così facendo, è possibile contenere le dimensioni del magazzino approvvigionandosi con tempistiche opportune in funzione dei lavori programmati. Identificato il Mean Time Between Failure (MTBF), ovvero il tempo medio che intercorre tra due guasti consecutivi, si programmano gli interventi di manutenzione con intervalli di tempo minori di tale valore.

Questo metodo di operare presuppone che la densità dei guasti sia rappresentata tramite una distribuzione Gaussiana [33]. Sotto questa ipotesi, è possibile prevenire un'elevata percentuale di guasti intervenendo con le opportune tempistiche in funzione della deviazione standard del valore MTBF. Tale metodologia, inoltre, si basa sull'ipotesi che il sistema lavori in condizioni deterministe e in regime di lavoro statico [34] e, pertanto, non può essere applicata a sistemi come i robot che operano in regime di lavoro dinamico. In accordo con quanto riportato in [35], il regime di lavoro dipende:

- dai parametri operativi della macchina, come, ad esempio, la velocità e il carico;
- dai parametri dell'ambiente di lavoro, quali: temperatura, umidità, vibrazioni, etc.

Se, come sovente accade, il sistema non si trova in queste condizioni semplicistiche o se non si hanno dati a sufficienza per stimare un appropriato valore di MTBF, tale strategia risulta inefficace, sia a causa di guasti che si manifestano prima dell'intervento schedulato, che a causa di interventi effettuati prematuramente [36].

#### 1.1.3 Manutenzione su condizione

Nella maggior parte dei contesti industriali la strategia di manutenzione adottata è quella preventiva [36]. Gli svantaggi legati a tale metodologia di intervento, lo sviluppo di sensori sempre più piccoli e interconnessi e il diffondersi della *cultura dei dati* stanno spingendo un crescente numero di imprese verso politiche di *Condition Based Maintenance* (CBM).

Grazie a sistemi di *Prognostic and Health Management* (PHM) è possibile massimizzare la vita utile del sistema riducendo i costi di manutenzione. Essi consentono di intervenire con azioni correttive solo quando, dal rilevamento di opportuni parametri di salute del sistema, si evince un deterioramento che può portare al guasto. La possibilità di predire il manifestarsi di un guasto, nel campo della robotica collaborativa, ha una duplice importanza: oltre a ridurre i costi legati all'attività di manutenzione, si può evitare che il robot, funzionando in condizioni diverse da quelle nominali, possa arrecare danno al personale che opera nelle zone limitrofe.

Le recenti tecniche di diagnostica permettono di rilevare il guasto incipiente in stadi molto precoci. Inoltre, grazie ad efficienti sistemi di prognostica che consentono di stimare la *Remaining Useful Life* (RUL) del sistema, è possibile ritardare l'intervento manutentivo fintanto che il guasto non progredisce in una condizione più grave, così da massimizzarne la vita utile, riducendo i costi [16].

Per implementare un sistema di CBM/PHM sono necessarie varie fasi che vanno dalla raccolta dei segnali "grezzi" dai sensori all'impiego di opportuni algoritmi che permettono di determinare lo stato di salute del sistema. Di seguito si riportano le fasi sopracitate [37]:

- 1. Raccolta dati: i sensori svolgono un ruolo fondamentale nell'implementazione di un sistema CBM/PHM. Essi permettono di misurare opportune grandezze utili per definire lo stato di salute del sistema.
- 2. **Denoising** e caratterizzazione dei dati: in genere, i segnali registrati dai sensori sono soggetti a rumori. Per questo motivo si utilizzano dei filtri per attenuare l'effetto che questi hanno alle alte frequenze. Successivamente, i segnali vengono analizzati per verificare che non siano corrotti.
- 3. Estrazione *feature*: i dati raccolti devono essere processati al fine di determinare degli indici di salute o *feature*. L'estrazione di queste può avvenire nel dominio del tempo, della frequenza o in una combinazione dei due.
- 4. **Costruzione del modello**: il modello ha il compito di correlare le *feature* estratte al comportamento del sistema. Sono molteplici gli algoritmi statistici e di Machine Learning che possono essere utilizzati a tale scopo. Questi sfruttano un dataset di *training* per riconoscere dei *pattern* che poi verranno usati per realizzare le previsioni.
- 5. Validazione del modello: al fine di verificare la bontà del modello realizzato, è necessario verificare che l'output da esso fornito sia coerente con i dati sperimentali raccolti. Per fare questo, si utilizza un dataset, diverso da quello di *training*, che permette il confronto tra il risultato ottenuto dal modello e i dati reali.

## 1.2 Classificazione dei guasti

Un macchinario o un impianto, durante il suo tempo di missione, è inevitabilmente soggetto al manifestarsi di guasti. In [31] un guasto è definito come la "cessazione dell'attitudine di un dispositivo ad adempiere alla funzione richiesta".

Dovendo analizzare le diverse tipologie di guasti, è necessario evidenziare la differenza tra i termini *fault* e *failure*, entrambi tradotti in italiano con la parola *guasto*. In accordo con quanto riportato in [38], una *fault* rappresenta un guasto che determina una variazione dell'operatività del sistema, ma che non la pregiudica completamente, a differenza della *failure* che determina l'impossibilità ad operare. Solitamente una *failure* è data dall'evoluzione di una o più *fault*.

I guasti possono essere classificati in vari modi, di seguito si approfondiranno le classificazioni in base all'entità del guasto, all'impatto che il guasto ha sul sistema complessivo e alla vita dell'elemento in cui si verifica il guasto [39].

### 1.2.1 Classificazione in base all'entità del guasto

In accordo alla definizione precedentemente riportata, si evince che un'entità viene considerata guasta anche se essa funziona parzialmente o con prestazioni diverse da quelle di progetto. In base a questo criterio, i guasti possono essere classificati nel seguente modo:

- guasti parziali: non pregiudicano del tutto il funzionamento del sistema, ma comportano una variazione delle prestazioni;
- guasti totali: la variazione delle prestazioni è tale per cui il dispositivo non è in grado di operare;
- guasti intermittenti: si manifesta un'alternanza tra periodi di guasto e periodi di funzionamento senza che vi sia alcun intervento manutentivo.

### 1.2.2 Classificazione in base all'impatto del guasto

Considerando un sistema complesso costituito da più componenti, si possono manifestare guasti che riguardano degli elementi che determinano il fermo dell'intero macchinario o meno. Pertanto, si possono distinguere:

• guasti di secondaria importanza: nel caso in cui la funzionalità dell'intero sistema non vengano ridotte;

- guasti di primaria importanza: se riducono la funzionalità dell'intero sistema;
- guasti critici: sono più gravi rispetto ai guasti di primaria importanza in quanto introducono dei rischi per l'incolumità delle persone.

### 1.2.3 Classificazione in base alla vita del dispositivo

I guasti vengono classificati in funzione della loro distribuzione nel corso della vita utile di una famiglia di elementi uguali sottoposti alle medesime condizioni ambientali ed operative. In particolare, si distinguono tre classi:

- guasti infantili: si manifestano nella fase iniziale della vita dei componenti, ovvero nel periodo che comunemente viene definito *rodaggio*. Essendo la natura di questi legata a difetti congeniti, la loro probabilità di verificarsi si riduce con il passare del tempo. Tali guasti sono imputabili ad errori di progetto, di costruzione o di montaggio. I guasti di questa tipologia possono essere ridotti grazie ad un adeguato sistema di controllo qualità;
- guasti casuali: si manifestano durante l'intera vita dei componenti con una probabilità che non dipende dal tempo. Questi guasti sono imputabili a fattori incontrollabili e, pertanto, non possono essere ridotti;
- guasti per usura: la probabilità di manifestarsi cresce con il passare del tempo. Sono dovuti a processi di deterioramento e possono essere ridotti tramite un adeguato piano di manutenzione.

Definito il tasso di guasto istantaneo come:

$$h(t) = \frac{dN_g(dt)}{dt} \cdot \frac{1}{N_v(dt)}$$
(1.1)

essendo  $N_v(t) \in N_g(t)$ , rispettivamente, il numero di componenti funzionanti e il numero di componenti guasti all'istante di tempo t, è possibile diagrammare qualitativamente l'andamento di tale grandezza nelle tre classi di guasto sopracitate. Sommando queste tre curve si ottiene quella che nella letteratura anglosassone viene chiamata bathtub curve (figura 1.1), ovvero curva a vasca da bagno, che riporta l'andamento del tasso di guasto durante l'intera vita del componente.



Figura 1.1: Curva a vasca da bagno [1].

# Capitolo 2 Descrizione del robot UR5

Nel presente lavoro di tesi si è considerato il manipolatore UR5 CB-Series presente all'interno del laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino.

Questo appartiene alla classe dei robot collaborativi, o *cobot*, pertanto è progettato e realizzato seguendo opportuni criteri che permettono di affiancarlo agli operatori durante il suo utilizzo. Esso è prodotto dall'azienda danese *Universal Robots*, la prima a fornire robot collaborativi a livello commerciale [40].

La famiglia dei robot collaborativi UR della serie CB si compone di tre diversi bracci robotici. Con riferimento al loro *payload* prendono i nomi: UR3, UR5 e UR10. Le principali caratteristiche di tali robot sono di riepilogate nella *tabella 2.1*.

	Carico utile al polso [kg]	Sbraccio [mm]	Peso [kg]
UR3	3	500	11,0
UR5	5	850	18,4
UR10	10	1300	28,9

Tabella 2.1: Caratteristiche principali robot UR CB-Series [12].

Coerentemente con quanto riportato dalla casa costruttrice in [41], le principali caratteristiche dei robot della famiglia UR sono:

• facilità di programmazione: ottenuta muovendo manualmente il robot. Tale metodo permette di programmare le operazioni che il robot deve eseguire senza dover scrivere alcun codice (*cfr. paragrafo* 2.2);

- **flessibilità di impiego**: la semplicità di programmazione permette una facile riallocazione del robot;
- flessibilità di installazione: il peso ridotto del braccio robotico ne consente l'installazione sulle pareti, sul soffitto e su carrelli mobili;
- collaboratività: se l'applicazione lo consente, il robot può lavorare in assenza di gabbie di protezione e in prossimità degli operatori;
- compatibilità con varie periferiche: si possono installare un'ampia gamma di strumenti come telecamere, sensori o tool realizzati ad hoc.

Il robot UR5 si compone di tre parti principali: l'unità di controllo, il teach pendant e il braccio robotico. Anche se in questa trattazione si considereranno soltanto i guasti che interessano quest'ultimo sistema, è bene sottolineare che avarie, di tipo software e hardware, possono verificarsi anche sui due restanti componenti principali.

La scelta di modellare esclusivamente il braccio robotico è dettata dal fatto che i segnali acquisiti tramite l'unità di controllo riguardano principalmente tale componente. Inoltre, considerata la complessità di tale sistema, possono presentarsi molteplici modalità di guasto che, in caso di applicazioni collaborative, possono compromettere la sicurezza del personale, da cui l'interesse a studiare tale elemento allo scopo di prevenire eventuali situazioni di pericolo.

### 2.1 Unità di controllo

L'unità di controllo, mostrata in *figura 2.1*, permette di definire e controllare la traiettoria dei sei giunti del robot. Al suo interno sono presenti:

- la scheda madre: costituisce la scheda elettronica principale ed ospita il processore e le schede di memoria. È possibile collegarsi ad essa tramite cavo Ethernet e porta USB;
- la scheda di controllo di sicurezza: gestisce gli input e gli output dell'unità di controllo e permette la connessione alle periferiche, come, ad esempio, i sensori dei dispositivi di sicurezza;
- il modulo USB: contiene il sistema operativo Linux, l'interfaccia di programmazione Polyscope e i programmi utente.

Il braccio robotico e l'unità di controllo comunicano tramite un cavo del tipo UNITRONIC LIYCY, lungo circa 6 metri. Le specifiche dell'unità di controllo sono riepilogate in *tabella 2.2*.

Materiale:	Alluminio
Peso:	$15 \mathrm{~kg}$
Dimensioni:	475x423x268  mm
Classificazione IP:	IP20
Range di temperatura:	$0 \div 50$ °C
Alimentazione elettrica:	100-240 Vac, 50-60 Hz
Porte I/O:	Ingressi digitali: 16 Ingressi analogici: 16 Uscite digitali: 2 Uscite analogiche: 2
Alimentazione elettrica I/O:	24 V, 2 A

Tabella 2.2: Specifiche tecniche dell'unità di controllo dell'UR5 [13].



Figura 2.1: Unità di controllo [2].

## 2.2 Teach pendant

Il *teach pendant*, mostrato in *figura 2.2*, rappresenta l'interfaccia uomomacchina del robot. Questo si costituisce di uno schermo *touch screen* da 12", grazie al quale è possibile programmare, comandare e controllare il braccio robotico, e da tre tasti fisici:

- Il pulsante on/off permette l'accensione, lo spegnimento e il riavvio del sistema.
- Il pulsante di emergenza a fungo aziona i freni del robot e scollega l'alimentazione elettrica. Tale pulsante deve essere azionato soltanto in caso di emergenza in quanto un uso sistematico porta all'usura del freno meccanico.
- Il pulsante *freedrive*, posto sulla parte posteriore, permette il movimento manuale del robot. Durante tale operazione il pulsante deve essere tenuto premuto.



Figura 2.2: Teach Pendant del robot UR5.

Il robot può essere programmato seguendo due diversi approcci. Il primo è quello classico in cui la programmazione avviene tramite la scrittura di codici nell'apposito linguaggio: URScript Programming Language. Tale codice viene poi caricato nell'unità di controllo tramite una porta USB in modo che possa essere eseguito. Il secondo metodo prevede di utilizzare l'ambiente PolyScope, la Grafic User Interface (GUI) realizzata dalla Universal Robots. È inoltre possibile definire il moto del robot combinando queste due differenti tecniche. Per programmare il robot tramite il *teach pendant* è necessario definire dei *waypoints* all'interno dello spazio di lavoro. Questi rappresentano i punti dai quali transiterà il braccio robotico durante l'esecuzione del programma. Un modo semplice per definirli è quello di muovere il robot manualmente, tenendo premuto il tasto *freedrive*, finché non si raggiunge il punto desiderato, successivamente, tramite un tasto sullo schermo *touch screen*, si acquisiscono le sue coordinate spaziali.

La traiettoria seguita dal *Tool Center Point* (TCP) viene definita a seconda di quale delle seguenti tre modalità viene scelta.

- **MoveL**: il TCP si muove secondo traiettorie rettilinee. Per realizzare tale tipologia di movimento, i giunti devono seguire delle traiettorie complesse.
- MoveJ: i giunti si muovono in modo da raggiungere la posizione finale in contemporanea. La traiettoria curvilinea che ne risulta è da preferire rispetto alle altre quando non è importante il percorso che l'utensile compie.
- MoveP: il tool si muove a velocità costante seguendo delle traiettorie circolari caratterizzate da un raggio predefinito e condiviso da tutti i *waypoints*.

Attraverso il *teach pendant* è inoltre possibile definire le velocità e le accelerazioni del TCP e dei singoli giunti. La traiettoria calcolata dall'unità di controllo viene effettuata seguendo un profilo di velocità di tipo trapezoidale.

### 2.3 Braccio robotico

Il braccio robotico, mostrato in *figura 2.3*, rappresenta l'organo principale del *sistema robot*.

La catena cinematica di un robot manipolatore si compone di una serie di corpi<sup>1</sup>, detti *link*, collegati tra loro da dei giunti. Tale catena cinematica viene detta *aperta* essendoci una sola sequenza di link che connette i due estremi della catena. Per quanto riguarda i giunti, si possono distinguere due diverse tipologie: quelli prismatici e quelli rotoidali. Nel primo caso il moto generato è di tipo traslatorio, mentre nel secondo caso è di tipo rotatorio. Tutti i robot della famiglia UR sono caratterizzati da sei link e altrettanti giunti rotoidali.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>In questa trattazione i link verranno considerati come dei corpi infinitamente rigidi essendo la loro lunghezza contenuta ed i carichi in gioco modesti.



Figura 2.3: Nomenclatura dei giunti del robot UR5.

I robot con strutture meccaniche simili a quella riportata in *figura 2.3* vengono detti *antropomorfi* in quanto la loro geometria è ispirata a quella del braccio umano. Infatti, i primi tre giunti vengono comunemente chiamati *base, spalla* e *gomito,* mentre i restanti tre costituiscono i *polsi* del robot. Questa struttura è quella più versatile poiché permette di raggiungere i punti dello spazio di lavoro da ogni direzione e con qualsiasi orientamento dell'utensile, superando anche eventuali ostacoli [15]. Per questo motivo tale tipologia di robot è quella più utilizzata nell'industria manifatturiera [42].

Lo spazio di lavoro del robot in esame, mostrato in *figura 2.4*, è di forma sferica. All'interno del *workspace* si hanno dei punti che possono essere raggiunti con qualunque orientamento del *tool* e altri che sono soggetti a limitazioni. In *figura 2.4* è riportata in blu l'area di lavoro consigliata, ovvero quella che rappresenta il volume di lavoro privo di vincoli, e in grigio l'area di lavoro massima, nella quale sono presenti delle limitazioni. In grigio è riportata anche l'area sovrastante il giunto di base, in corrispondenza della quale il robot non gode della piena mobilità.

Quando si programma un robot per svolgere una determinata attività si è portati a pensare al moto che l'utensile, o *end-effector*, compie all'interno dello spazio di lavoro in termini di coordinate cartesiana nello spazio tridimensionale, ovvero in riferimento agli assi X,Y e Z. Tuttavia, il robot, per posizionare correttamente il *tool* nel punto desiderato, deve prima convertire gli spostamenti riferiti al piano cartesiano in angoli target per ciascuno dei giunti interessati dal moto. Tale problema di conversione viene chiamato *cinematica inversa*. La risoluzione di questo problema, in alcune situazioni,



(a) UR5 all'interno dell'area di lavoro (b) UR5 all'interno dell'area di lavoro consigliata massima

Figura 2.4: Spazio di lavoro del robot UR5 [3].

porta inevitabilmente a delle difficoltà .

Universal Robots descrive tre scenari in cui i robot UR possono incorrere in problemi nel raggiungere la posizione richiesta, o perché non è fisicamente possibile per il robot o perché non è possibile raggiungerla dalla posizione corrente dei giunti del robot [3]. Queste problematiche prendono il nome di *singolarità* e sono classificate nel seguente modo:

- Limite esterno allo spazio di lavoro: il braccio robotico può raggiungere qualunque punto con qualunque orientazione all'interno dell'area di lavoro consigliata, mentre i punti al di fuori di essa, ma entro l'area di lavoro massima, possono essere raggiunti solo con determinanti orientamenti.
- Limite interno allo spazio di lavoro: è raccomandato evitare movimenti che interessano la colonna al di sopra e al di sotto del giunto di base in quanto molte posizioni e molti orientamenti non possono essere ottenuti a causa dell'ingombro dei link del robot. Inoltre, possono sorgere dei problemi nell'esecuzione di movimenti lineari poiché, anche a fronte di velocità dell'utensile ridotte, si determina una velocità di rotazione del giunto di base molto elevata, rendendo alcuni movimenti non eseguibili o insicuri. Per tali ragioni, in fase di programmazione, è meglio evitare di operare in tale regione. Se non è possibile fare a meno di interessare tale area è bene utilizzare la modalità *MoveJ*, piuttosto che *MoveL*, in modo da evitare moti lineari dell'utensile.

• Allineamento del polso: la mobilità del polso 2 risulta limitata quando assume un angolo pari a 0° o 180°, trovandosi allineato con il piano in cui ruotano la spalla, il gomito e il polso 1.

La casa costruttrice non fornisce strumenti per verificare in tempo reale se il robot incorre in singolarità, ma, in fase di programmazione, queste vengono evidenziate sul *teach pendant* in modo da poterle evitare cambiando la traiettoria seguita dal TCP.

Rispetto ad un classico robot industriale, l'UR5 è caratterizzato da peso e ingombri contenuti, di contro, essendo progettato per lavorare a stretto contatto con l'uomo, possiede velocità e forze massime minori.

Materiale:	Alluminio e polipropilene
Peso:	18,4 kg
Sbraccio:	850 mm
Ripetibilità:	$0,1 \mathrm{~mm}$
Raggio d'azione giunti:	$\pm 360^{\circ}$
Velocità massima giunti:	$\pm 180^{\circ}/s$
Range temperatura:	$0\div50$ °C
Classificazione IP:	IP54
Alimentazione elettrica:	48 Vdc
Consumo energia elettrica:	Min. 90 W Avg. 150 W Max. 325 W
Porte I/O:	Ingressi digitali: 2 Ingressi analogici: 2 Uscite digitali: 2 Uscite analogiche: 2
Vita operativa:	35000 h

Tabella 2.3: Specifiche tecniche del braccio robotico [13].

#### 2.3.1 Azionamenti

Come descritto precedentemente, la struttura meccanica di un robot è costituita da link e da giunti. Il moto del braccio robotico è ottenuto grazie agli azionamenti che possono essere posizionati in corrispondenza del giunto o meno. In questo secondo caso sarà necessario disporre di un organo per la trasmissione della potenza meccanica.

Gli azionamenti sono dei dispositivi che permettono di trasformare l'energia in ingresso in energia meccanica, sulla base di segnali di bassa potenza o segnali *deboli*.

Gli azionamenti usati nel campo della robotica sono di tre tipologie [42]:

- azionamenti pneumatici: sono alimentati da aria a pressione compresa tra i 5 e gli 8 bar. Questi azionamenti sono quelli più semplici dal punto di visto progettuale e di realizzazione e, pertanto, sono anche i più economici. Essi sono utilizzati in robot di piccola taglia, solitamente impiegati per operazioni di *pick and place*.
- azionamenti oleodinamici: permettono di operare con carichi molto elevati. Gli svantaggi di questa tipologia di azionamenti sono legati alla gestione dell'olio in pressione. È necessario disporre di un impianto oleodinamico, non sempre presente in contesti industriali al contrario dell'impianto di aria compressa, e, inoltre, si va incontro a inevitabili perdite dagli organi di tenuta.
- azionamenti elettrici: sono ad oggi la tipologia più utilizzata vantando: elevata precisione e ripetibilità, semplicità di controllo ed elevatta compattezza.

Sono diverse le tipologie di motori elettrici installabili nel campo della robotica: motori passo-passo, motori DC brushless, motori asincroni con inverter e motori sincroni brushless. Quest'ultimo è quello più utilizzato, nonché quello installato sull'UR5, viste le elevate prestazioni ottenibili a fronte di dimensioni e pesi contenuti.

Nell'UR5 ogni giunto ospita il relativo azionamento rappresentato da un motore elettrico sincrono a magneti permanenti, spesso indicato con l'acronimo PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). La conversione di potenza fra la rete e il carico elettrico avviene per mezzo di due stadi, o convertitori, fra loro connessi per mezzo di un elemento di accoppiamento detto link. Tale strategia di conversione di potenza, di cui uno schema è riportato in figura 2.5, viene definita conversione indiretta e rappresenta attualmente l'opzione più diffusa per la modulazione della potenza elettrica nei sistemi di attuazione.

Al fine di ridurre gli ingombri e le masse, Universal Robots ha optato per motori *frameless*, ovvero privi di carter o *housing*, integrati all'interno dell'articolazione del robot. Gli azionamenti installati sulla famiglia dei robot



Figura 2.5: Schema di convertitore elettronico di potenza.

UR derivano dai motori della serie KBM prodotti dall'azienda statunitense Kollmorgen. Questi sono stati modificati in fase progettuale al fine di soddisfare le esigenze dell'azienda danese [43]. Infatti, da un'analisi di alcuni giunti smontati si è riscontrato che le dimensioni di tali elementi non corrispondono a quelle riportate sul catalogo degli azionamenti della serie KBM, mentre si è trovata una maggior affinità con quelli della serie TBM. Un'analisi più approfondita sulle caratteristiche dei motori elettrici appartenenti a queste due serie è affrontata nel *paragrafo 3.3*.

Grazie all'avanzata progettazione elettromagnetica dei motori Kollmorgen è possibile ottenere coppie elevate a fronte di coppie di riluttanza e distorsioni armoniche ridotte. L'utilizzo di terre rare ad elevata intensità permette di ottenere una coppia continua compresa tra 1,45 e 3,445 Nm e una coppia di picco da 4,91 a 12,812 Nm a seconda della taglia del motore. Tali soluzioni ingegneristiche permettono di raggiungere un rapporto fra il peso morto e la capacità di carico poco superiore a 3:1.

I motori utilizzati da Universal Robots sono di cinque taglie diverse, a seconda del robot e del giunto su cui vengono installati. Nel robot UR5 sono installati tre azionamenti *Size3* nei giunti di base, spalla e gomito e tre *Size* 1 nei giunti di polso.

Le coppie massime erogabili dai motoriduttori delle diverse taglie sono riportate in *tabella 2.4*. In base a quanto affermato dalla casa costruttrice del robot in [14], però, a causa dell'effetto degli attriti e delle coppie di inerzia, non è possibile usufruire appieno di tali valori di coppia nella propria applicazione.

Un altro vantaggio di questi motori è legato al funzionamento senza rumore e all'elevata efficienza energetica. Quest'ultima permette di ridurre sia la potenza elettrica prelevata dalla rete, che la produzione di calore. I motori, rimanendo più freddi, funzionano al di sotto dei loro valori nominali massimi e, di conseguenza, raggiungono una vita di servizio più lunga [43].

Taglia del giunto	Coppia [Nm]
Size0	12
Size1	28
size2	56
Size3	150
Size4	330

Tabella 2.4: Coppie dei giunti in base alla taglia [14].

#### 2.3.2 Riduttori

In generale, i motori elettrici ruotano a velocità elevate e sono in grado di generare coppie relativamente basse, per questo motivo si è soliti accoppiarvi un riduttore. Ad ognuno dei sei azionamenti dell'UR5 è collegato un riduttore armonico, prodotto dall'azienda Harmonic Drive AG della serie HFUS-2SH [44]. Tale tipologia di riduttori sono molto utilizzati nel campo della robotica vantando elevati rapporti di trasmissione, precisione e *backlash* ridotti a fronte di pesi e dimensioni contenute.

Come si vede dalla *figura 2.6*, un *harmonic drive* è composto da tre componenti principali [44]:

- wave-generator: è l'elemento generalmente collegato all'albero motore. È costituito da un disco di acciaio ellittico dotato di un mozzo centrale e di un sottile cuscinetto a sfere deformabile ellitticamente;
- **flexspline**: si presenta come una "tazza" in acciaio cilindrica deformabile con una dentatura disposta radialmente sulla superficie esterna;
- circular spline: rappresenta l'elemento esterno che avvolge il *wave-generator* e il *flexspline*. A differenza degli altri due elementi, è rigido ed è dotato di una dentatura interna.

Nei cataloghi commerciali, ad ogni harmonic drive è assegnato un rapporto di trasmissione (N) che permette di conoscere il comportamento della sua posizione, velocità e coppia. In particolare, note le rotazioni di due delle tre porte del riduttore è possibile determinare la restante tramite la seguente espressione:

$$\theta_{wg} = (N+1) \ \theta_{cs} - N \ \theta_{fs} \tag{2.1}$$



Figura 2.6: Componenti di un harmonic drive.

essendo  $\theta_{wg}$ ,  $\theta_{fs} \in \theta_{cs}$ , rispettivamente, le rotazioni del *wave-generator*, del *flexspline* e del *circular spline*. Considerando N costante, derivando l'equazione precedente si ottiene:

$$\omega_{wq} = (N+1) \ \omega_{cs} - N \ \omega_{fs} \tag{2.2}$$

avendo indicato con  $\omega_{wg}$ ,  $\omega_{fs} \in \omega_{cs}$  le velocità angolari dei tre componenti del riduttore armonico. Applicando la legge di conservazione dell'energia alle tre porte, la coppia idealmente trasmessa sarà data da:

$$T_{wg} = \frac{1}{N+1} T_{cs} = -\frac{1}{N} T_{fs}$$
(2.3)

dove  $T_{wg}$ ,  $T_{fs}$  e  $T_{cs}$  sono le coppie, definite tramite la simbologia indicata precedentemente. Le equazioni di coppia, velocità e posizione sopra riportate permettono di descrivere il comportamento dinamico dell'*harmonic drive* nell'ipotesi di trasmissione ideale [45].

Nel caso in esame, il *wave-generator* è utilizzato come elemento di ingresso, il *circular spline* come elemento di uscita del riduttore e il *flexspline* è mantenuto fermo. Pertanto, essendo il valore di N riportato in [44] pari a 100, si ottiene un rapporto di trasmissione pari a 101:1.

Il backlash ridotto che caratterizza tali dispositivi è dovuto al loro particolare principio di funzionamento. Il wave-generator, una volta messo in rotazione, determina la deformazione ellittica del flexspline, i cui denti ingranano sui quelli interni del circular spline, in corrispondenza dell'asse maggiore dell'ellisse. Avendo il flexspline due denti in meno del circular spline, una rotazione di 180° del *wave-generator* provoca un movimento relativo tra *flexspline* e *circular spline* di un dente.

#### 2.3.3 Sensori

In base alle informazioni che possono essere estratte dal robot e dall'analisi di giunti smontati dal resto della struttura, è possibile affermare che in ogni giunto dei robot UR sono presenti i seguenti sensori:

- Resolver: anche detto encoder magnetico, è prodotto dall'azienda britannica Renishaw [46] ed ha il compito di misurare la posizione angolare. Al fine di ottenere una misura quanto più accurata possibile, il sensore è calettato su un albero cavo messo in rotazione dal riduttore e non direttamente dall'albero motore, in modo da misurare pure il gioco introdotto dal riduttore stesso. Questa soluzione permette di ridurre gli errori sistematici, ottenendo una ripetibilità pari di 0,1 mm. L'albero cavo, alla cui estremità è posto l'encoder magnetico, attraversa il riduttore e il motore elettrico in modo da disporre tutta la sensoristica su un unico lato del giunto.
- Encoder ottico: sfrutta un raggio luminoso intermittente per effettuare misurazioni di velocità angolare. Esso, a differenza del resolver, è messo in rotazione dall'albero motore e permette di effettuare la retroazione della velocità sul controllore.
- Sensore di corrente: permette la chiusura del relativo loop di controllo.
- **Termocoppia**: consente di verificare che la temperatura del giunto rimanga al di sotto di una soglia ritenuta critica.

## Capitolo 3

## Descrizione del modello del robot UR5

Come riportato in precedenza, per sopperire alla carenza di dati storici relativi al funzionamento di robot in presenza di guasti, si è utilizzato un approccio *model-based* per creare un database sufficientemente ampio da permettere l'estrazione di *feature* relative allo stato di salute del robot in esame. Questo si traduce nella necessità di implementare un modello *high-fidelity* che permetta di simulare il comportamento del robot sia in condizioni nominali che in presenza di guasti.

Il modello in questione, implementato in ambiente MATLAB/Simulink, è ampiamente descritto in [15]. Uno dei vantaggi di tale modello è rappresentato dall'architettura modulare. Questo ne consente un progressivo miglioramento sostituendo soltanto i blocchi di interesse e lasciando inalterata la struttura del modello stesso.

Lo schema a blocchi, rappresentato in *figura 3.1*, si costituisce di quattro sottositemi principali: logica di controllo ed elettronica di potenza, azionamenti elettrici e riduttori, struttura meccanica, sensori.

Il modello permette la simulazione sia della componente software del robot che di quella hardware. Infatti, l'input è costituito dalla posizione angolare di target che deve essere seguita dai sei giunti, mentre l'output è rappresentato dalla cinematica del robot.

Analizzando l'architettura del sistema, e di conseguenza anche quella dello schema a blocchi, si osserva che l'elettronica di controllo ha come input i segnali di errore ( $\varepsilon_{pos}$ ) ottenuti dal confronto tra la posizione angolare imposta ad ogni singolo giunto ( $set_{pos}$ ) e le posizioni di feedback ( $fb_{pos}$ ) fornite dai sensori. Dopo aver compensato tali errori, nonché quelli di velocità ( $\varepsilon_{vel}$ ) e corrente ( $\varepsilon_{cor}$ ), ottenuti grazie ad un sistema di controllo ad anelli annidati, si determinano le tensioni di riferimento ( $ref_{ten}$ ) da inviare all'e-



Figura 3.1: Modello del robot UR5 in ambiente Simulink.
lettronica di potenza. Questa ha il compito di modulare la potenza elettrica prelevabile dalla rete in modo da fornire al sistema di attuazione quella di cui necessita per raggiungere il segnale di set imposto. Il blocco relativo ai motoriduttori fornisce in uscita sei coppie che, a loro volta, costituiscono gli input del modello dinamico della struttura meccanica del robot, sviluppato grazie all'ambiente Simscape Multibody. L'uscita di quest'ultimo è rappresentata dalle posizioni e velocità dei giunti che, dopo esser state filtrate e digitalizzate nei blocchi dei sensori, permettono la chiusura dei relativi loop. Uno schema funzionale di quanto appena descritto è riportato in *figura 3.2* 



Figura 3.2: Schema funzionale di un attuatore elettromeccanico.

Sfruttando la modularità del modello descritto in [15], è stato possibile migliorare quest'ultimo ottenendo un comportamento più simile a quello del sistema fisico reale. Tali modifiche sono state apportate perché, per realizzare una trattazione di carattere diagnostico e prognostico tramite un approccio *model-based*, è essenziale disporre di una modellazione *high-fidelity* del sistema in esame. Le migliorie di maggior rilievo che sono state apportate riguardano il modello del riduttore, del motore elettrico e dei sensori. Nel riduttore è stato modellato il fenomeno del *backlash* e si è introdotto un modello di attrito più accurato rispetto a quello coulombiano e viscoso disponibile nella libreria di Simulink. Grazie a tale miglioria è possibile tener conto della discontinuità tra le condizioni di attrito statiche e dinamiche. Per quanto riguarda l'azionamento elettromeccanico, si è sostituito il modello del motore in corrente continua di prima approssimazione con quello di un motore brushless AC (BLAC), essendo questo quello installato nei giunti del robot. Infine, con l'*upgrade* del modello dei sensori, si sono introdotti il processo di digitalizzazione e le dinamiche nei sensori di velocità e corrente, modellati precedentemente tramite un guadagno unitario.

In particolare, il modello del motore brushless AC, in questa prima fase di studio, è stato implementato in un unico giunto, quello di spalla, al fine di evitare di rendere eccessivamente onerosa, dal punto di vista computazionale, l'esecuzione dell'intero modello del robot. Infatti, sfruttando il *Simulink Profiler*, uno strumento implementato dalla MathWorks per analizzare i tempi di calcolo necessari ad eseguire gli elementi e i sottosistemi degli schemi a blocchi, è stato possibile appurare che l'esecuzione del modello del motore trifase necessita di un tempo 2,5 volte maggiore rispetto a quello monofase. Per introdurre il motore BLAC nello schema a blocchi del robot, è necessario modificare anche la modellazione della logica di controllo, dell'elettronica di potenza e del sensore di corrente. Ognuno di questi sottosistemi richiede un tempo di esecuzione circa pari al doppio di quello impiegato dai corrispondenti modelli monofase.

Considerato l'elevato numero di simulazioni necessarie per la creazione di un database sufficientemente ampio da permettere l'estrazione degli indici di salute del robot, si è usato il *Profiler* di Simulink per ridurre i tempi di calcolo necessari al modello, sostituendo alcuni componenti con altri computazionalmente meno dispendiosi. Inizialmente, al fine di rendere il modello del motore trifase eseguibile anche in assenza del toolbox Simscape Ectrical, la trasformata e la trasformata inversa di Park sono state realizzate costruendo, elemento per elemento, un vettore colonna, successivamente convertito nella matrice di trasformazione tramite la funzione *reshape*. Dall'analisi dei tempi computazionali si è constatato che, utilizzando i blocchi importabili dalla libreria di Simscape, è possibile ottenere una riduzione dei tempi di calcolo pari al 14% in entrambe le trasformazioni. Pertanto, si è scelto di sostituire la modellazione di cui prima con i blocchi più efficienti. Inoltre, nell'ottica di ridurre al minimo i tempi di simulazione richiesti del modello software del robot, si è fatto in modo di impiegare il minor numero di blocchi Switch, sostituendoli laddove possibile, essendo particolarmente onerosi da eseguire. Un ulteriore accorgimento è stato quello di eliminare gli Scope e i blocchi To Workspace, introducendo il Log dei segnali. Grazie all'app Data Inspector, disponibile all'interno dell'ambiente Simulink, è possibile visualizzare in tempo reale l'andamento delle grandezze di cui si è fatto il Log. L'utilizzo del Data Inspector offre numerosi vantaggi rispetto agli Scope, tra i quali: interfaccia *user-friendly*, possibilità di importare dati dal *Workspace*, da file MATLAB o Excel, elevata personalizzazione dei risultati grafici, etc.

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il solver di Simulink ode14x, con passo di integrazione costante, pari a  $10^{-6}$  s. Al fine di ridurre la quantità di dati salvati in memoria, si è introdotta la decimazione dei segnali, grazie alla quale è possibile sottocampionare il segnale originale. Nel caso in esame, avendo introdotto una decimazione pari a 1000, per ogni secondo di simulazione verranno salvati solo 1000 valori, anziché  $10^6$ . In assenza di tale accorgimento, l'esecuzione del modello sarebbe incompatibile con la quantità di RAM disponibile sui calcolatori commerciali, considerato l'elevato numero di segnali acquisiti.

L'aver scelto di inserire nella modellazione dell'UR5 un unico azionamento trifase comporta la necessità di modificare lo schema a blocchi per simulare la presenza di guasti in giunti diversi da quello di spalla, in modo da avere il modello del motore sincrono a magneti permanenti nel giunto desiderato. Anche se in questa trattazione si è considerata la presenza di guasti soltanto nel secondo giunto, il fine ultimo dello studio è quello di simulare i loro effetti in ognuno dei sei azionamenti del manipolatore. Infatti, essendo la metodologia qui riportata di carattere generale è possibile applicarla a tutti i giunti del robot.

Sono diverse le ragioni per cui si è scelta l'articolazione di spalla come primo giunto da studiare ai fini diagnosti e prognostici. In primo luogo, soprattutto nelle operazioni di *pick-and-place*, i giunti di base, spalla e gomito sono quelli più usati e, dunque, quelli più soggetti ad usura. Inoltre, gli effetti di un eventuale guasto su questi giunti risultano essere più gravi, in termini di rischi per il personale, essendo le masse, le inerzie e i raggi di azione maggiori rispetto ai giunti di polso.

Alla luce delle motivazioni sopra riportate, per i primi tre giunti, in [47] sono stati analizzati i tempi e gli angoli di arresto che si riscontrano quando il robot entra in modalità *Protective Stop*<sup>2</sup> o, analogamente, a seguito dell'azionamento del pulsante di emergenza a fungo presente sul *Teach Pendant*. In particolare, la campagna sperimentale è stata condotta al variare della velocità angolare, del *payload* e dell'estensione del braccio, ottenuta facendo assumere ad ognuno dei sei giunti una specifica posizione angolare. Come riportato in *tabella 3.1*, per ognuna di queste grandezze si è considerato il 33%, il 66% e il 100% del valore massimo. Per quanto riguarda l'estensione

 $<sup>^{2}</sup>$ I robot della famiglia UR si arrestano aumaticamente per ragioni di sicurezza quando viene riscontrata un'anomalia dal sistema di controllo o a seguito di un urto del braccio robotico o dell'end-effector.

	Velocità [°/s]	Payload [kg]	Posizione angolare dei giunti [°]
100%	180,0	$^{5,0}$	$[180 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
66%	118,8	3,3	$[180 - 46 \ 95 - 46 \ 0 \ 6]$
33%	59,4	1,7	$[180 - 65 \ 140 - 74 \ 0 \ 9]$

del braccio robotico, nella suddetta tabella sono riportati gli angoli che i sei giunti devono assumere per ottenere tali estensioni, mentre in *figura 3.3* sono riportate le tre diverse configurazioni.

Tabella 3.1: Valori di velocità, payload e posizione angolare dei sei giunti del braccio robotico considerati nella campagna sperimentale per la determinazione dei tempi e degli angoli di arresto.



Figura 3.3: Braccio robotico con estensione pari al 100% (a), 66% (b) e 33% (c) dell'estensione massima.

In *tabella 3.2* sono riepilogati i tempi e gli angoli di arresto dei giunti presi in esame in corrispondenza dei valori massimi delle tre variabili considerate.

Giunto	Tempo di arresto [s]	Angolo di arresto [°]
Base	0,144	13,18
Spalla	0,344	30,02
Gomito	0,136	11,92

Da questa si evince che l'articolazione di spalla è quella che presenta la maggior criticità, da cui la decisione di analizzarla per prima.

Tabella 3.2: Tempi e angoli di arresto dei primi tre giunti con velocità, payload ed estensione massima.

Con riferimento al secondo giunto del robot, in *figura 3.4* sono riportati i tempi e gli angoli di arresto necessari all'UR5 per arrestarsi in caso di emergenza al variare della velocità angolare, considerando il 33%, il 66% e il 100% del *payload* e dell'estensione del braccio robotico. In particolare, coerentemente con quanto mostrato nella relativa legenda, si sono considerati tre diversi colori per rappresentare le configurazioni assunte dal manipolatore, mentre si sono utilizzate tre differenti tipologie di linee e *marker* per distinguere i tre valori del *payload* presi in esame.

Nel presente capitolo verrà esposto nel dettaglio lo schema a blocchi del manipolatore UR5. Come accennato sopra, l'introduzione del modello dell'azionamento BLAC nel giunto di spalla comporta la modifica di alcuni sottosistemi ad esso collegati, pertanto, nel corso della trattazione si distinguerà la modellazione di prima approssimazione relativa al modello del motore DC, da quella *high fidelity* correlata all'azionamento BLAC.



Descrizione del modello del robot UR5

Figura 3.4: Tempi e angoli di arresto del giunto di spalla al variare della velocità con payload ed estensione pari al 33%, 66% e 100%.

# 3.1 Logica di controllo

Per far si che il robot, e pertanto anche il suo modello, si comporti nel modo desiderato è necessario comandare opportunamente gli organi di attuazione. Questo è possibile tramite la definizione di specifiche leggi di controllo.

Universal Robots non fornisce alcuna informazione in merito alla tipologia di controllo adottata nei sui bracci robotici, pertanto, si è ipotizzata una regolazione basata su logica PID, essendo questa la tipologia più frequentemente utilizzata per gli azionamenti elettromeccanici in ambito industriale. È verosimile pensare che i robot della famiglia UR siano dotati di un sistema di controllo più complesso rispetto a quello considerato, capace di compensare efficacemente i disturbi agenti sul sistema.

Nello schema a blocchi del manipolatore, la tipologia di controllo impiegata negli anelli di posizione e velocità è uguale in tutti i giunti, mentre il controllore di corrente del secondo giunto differisce dai restanti per far fronte al diverso segnale di corrente restituito dal motore elettrico.

Nei seguenti paragrafi verrà prima esposta la logica di controllo adottata nei giunti di base, gomito e nei tre polsi e successivamente quella relativa al giunto di spalla, in cui è stato introdotto il modello del motore BLAC.

## 3.1.1 Modello di prima approssimazione

Come si vede dallo schema a blocchi riportato in figura 3.5, il controllo è stato realizzato tramite tre anelli annidati. Essi permettono di compensare la presenza di disturbi agenti sul sistema intervenendo sulle dinamiche più interne, ottenendo una risposta più rapida. In particolare, l'anello più esterno permette di controllare la posizione angolare (qFB) ed è realizzato soltanto con un contributo proporzionale, mentre i due anelli più interni consentono il controllo della velocità angolare (qdmFB) e della corrente (iFB), tramite dei controllori di tipo PI<sup>3</sup>.

Per ogni giunto, i controllori degli anelli di corrente restituiscono come output le tensioni di riferimento ( $V_{ref}$ ) che, dopo esser state opportunamente modulate e amplificate in potenza, permettono di azionare i relativi motori elettrici.

 $<sup>^{3}\</sup>mathrm{Con}$ il suffissoFBsono state indicate le grandezze di  $f\!eedback$  restituite in output dai sensori.



Figura 3.5: Logica di controllo in retroazione di posizione, velocità e corrente.

### 3.1.2 Modello di dettaglio

I motori sincroni a magneti permanenti sono dispositivi trifase a corrente alternata e, come tali, sono caratterizzati da grandezze elettriche (tensioni, correnti e flussi magnetici) che variano nel tempo secondo una legge sinusoidale.

Al fine di semplificare la modellazione e il controllo delle macchine elettriche sincrone, sovente in letteratura si applicano delle trasformazioni che permettono di passare da un sistema in assi trifase  $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  ad un modello in corrente continua. Tramite la trasformazione dq0 (direct-quadrature-zero) è possibile convertire le grandezze trifase, nel sistema di riferimento abc, in grandezze continue, nel sistema di riferimento in assi rotanti dq0. La suddetta conversione, proposta per la prima volta in [48], è ottenuta dal prodotto tra le matrici di trasformazione di Clarke e di Park.

La trasformazione di Clarke permette di proiettare i fasori delle grandezze elettriche trifase riferite agli assi magnetici  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  sui due assi magnetici  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  solidali allo statore. La suddetta trasformazione viene realizzata tramite il seguente prodotto matriciale:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$
(3.1)

Dove:

- *a*, *b* e *c* sono le componenti di una generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento *abc*;
- $\alpha \in \beta$  rappresentano le componenti della grandezza elettrica nel sistema di riferimento stazionario  $\alpha\beta 0$ ;
- 0 indica la componente nulla nel sistema di riferimento stazionario  $\alpha\beta 0$ .

Una raffigurazione di una generica grandezza elettrica in forma fasoriale in assi  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  e la sua proiezione sugli assi  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  è riportata in *figura 3.6*, mentre i relativi andamenti temporali sono rappresentati in *figura 3.7*. Da queste figure è possibile notare come la trasformata di Clarke permetta di passare da un sistema di riferimento con tre componenti ad uno con due sole componenti, ottenendo considerevoli vantaggi nel sistema di controllo della grandezza trasformata.



Figura 3.6: Generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento in assi trifase  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  e nel sistema di riferimento in assi di statore  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  [4].

Un'ulteriore semplificazione la si può ottenere passando da grandezze che oscillano con legge sinusoidale a grandezze costanti nel tempo. Questo è possibile tramite la trasformata di Park che permette di proiettare i due fasori in assi di statore  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  su due assi solidali al rotore  $\vec{d}, \vec{q}$ . In particolare, la direzione dell'asse  $\vec{d}$ , detto asse diretto, coincide con quella individuata dal vettore del flusso magnetico di rotore, mentre l'asse  $\vec{q}$ , chiamato anche asse di quadratura, è orientato in modo da creare un angolo retto con il precedente asse<sup>4</sup>. Come si può vedere dalla figura 3.8, i fasori in assi  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ possono essere proiettati sugli assi  $\vec{d}, \vec{q}$  sia considerando l'allineamento tra l'asse  $\vec{\alpha}$  e l'asse  $\vec{d}$  che tra l'asse  $\vec{\alpha}$  e l'asse  $\vec{q}$ .

 $<sup>^4\</sup>mathrm{L'angolo}$ di 90° individuato tra l'asse diretto e quello di quadratura è misurato coerentemente con verso di rotazione del rotore.



Figura 3.7: Andamento temporale di una generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento in assi trifase  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  e nel sistema di riferimento in assi di statore  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ .



Figura 3.8: Proiezione dei fasori in assi  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  sugli assi  $\vec{d}, \vec{q}$  considerando l'allineamento tra l'asse  $\vec{\alpha}$  e l'asse  $\vec{d}$  (a sinistra) e tra l'asse  $\vec{\alpha}$  e l'asse  $\vec{q}$  (a destra) [5].

Avendo considerato nella presente trattazione quest'ultimo caso, si riporta di seguito la relativa trasformazione:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.2)

Dove:

- $\alpha$ ,  $\beta$  e 0 sono le componenti di una generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento si statore;
- $d, q \in 0$  rappresentano le componenti della grandezza elettrica nel sistema di riferimento di rotore.

Come anticipato precedentemente, moltiplicando tra loro la matrice di Clarke e la matrice di Park è possibile passare direttamente dal sistema di riferimento *abc* al sistema dq0. La matrice di trasformazione che si ottiene da tale moltiplicazione è riportata nella seguente equazione, mentre l'andamento della grandezza trifase considerata nei sistemi di riferimento *abc* e dq0 è mostrato in *figura 3.9*.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\left(\theta\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{2}\right) \\ \cos\left(\theta\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{2}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$
(3.3)

In figura 3.10 è mostrato lo schema logico del servosistema elettromeccanico in controllo posizione in esame. Grazie alla trasformazione di cui sopra che permette di ottenere due sole correnti continue piuttosto che tre correnti alternate, il controllo nell'anello di corrente viene notevolmente semplificato. La corrente di quadratura  $i_q$ , responsabile della generazione della coppia elettromagnetica, viene confrontata con il segnale di riferimento proveniente dall'anello di velocità, mentre la corrente diretta  $i_d$  viene comandata costantemente a zero. Quest'ultima non contribuisce alla generazione di coppia, anzi, per ottenere la coppia massima è necessario che assuma un valore nullo. In letteratura tale tecnica di regolazione viene detta *controllo vettoriale* o *Field Oriented Control*, in virtù del fatto che le correnti di fase sono modulate in modo da ottenere una risultante della loro distribuzione spaziale costantemente sfasata di 90°E rispetto all'asse magnetico di rotore.



Figura 3.9: Andamento temporale di una generica grandezza elettrica nel sistema di riferimento in assi trifase  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  e nel sistema di riferimento in assi di statore  $\vec{d}, \vec{q}$ .



Figura 3.10: Schema logico del servosistema elettromeccanico in controllo posizione con motore BLAC. \$37\$

# 3.2 Elettronica di potenza

L'elettronica di potenza rappresenta l'insieme dei dispositivi elettronici che permettono di gestire la potenza elettrica scambiata tra la rete e il carico. Come introdotto nel paragrafo 2.3.1, in genere, la conversione di potenza avviene tramite due stadi, o convertitori, collegati tra loro da un link. Nel caso in esame, il convertitore lato rete trasforma la tensione di rete in una tensione continua al dc-link, la quale verrà trasformata nuovamente dal convertitore lato carico nella tensione alternata che alimenta gli azionamenti del robot.

Come riportato nel paragrafo 3.1, i segnali in uscita dai controllori di corrente vengono modulati e successivamente utilizzati per comandare l'elettronica di potenza, in modo da azionare i motori elettrici.

La tecnica di modulazione di cui si fa uso prende nome di *Pulse Width Modulation* (PWM) e grazie ad essa è possibile passare da un segnale continuo, che oscilla tra un valore massimo ed un valore minimo, ad un segnale digitale, che può assumere soltanto due valori.

Indicando con  $t_{ON}$  e  $t_{OFF}$ , rispettivamente, il tempo in cui il segnale digitale assume il valore massimo e quello in cui esso assume il valore minimo all'interno del periodo di modulazione T, si può definire il *duty cycle* (*dc*) tramite il seguente rapporto:

$$dc(t) = \frac{t_{ON}(t)}{T} \tag{3.4}$$

Un esempio di un segnale PWM avente *duty cycle* pari al 25% è riportato in *figura 3.11*.



Figura 3.11: Esempio di un segnale PWM con duty cycle pari al 25%.

L'informazione contenuta dal segnale *modulante*, che nel caso in esame coincide con  $V_{ref}$ , viene trasmessa variando l'ampiezza dell'impulso, ovvero il tempo  $t_{ON}$  o il *duty cycle*, essendo il periodo T costante. Questo fa si

che il valor medio della tensione impulsiva segua l'andamento del segnale modulate.

Come mostrato in *figura 3.12*, per determinare il segnale impulsivo si confronta un segnale periodico, detto *portante*, con il segnale modulante. Se il modulo di quest'ultimo è maggiore di quello della portante, il segnale impulsivo assume un valore *alto*, altrimenti assume un valore *basso*. Nel caso oggetto di studio, si è considerata una portante avente forma d'onda triangolare bipolare di ampiezza costante.

È facile intuire che al crescere della frequenza della portante, ovvero al ridursi del periodo di commutazione, aumenta l'accuratezza con cui il segnale modulato approssima la modulate. Allo stesso tempo, però, non si possono adottare frequenze indiscriminatamente elevate poiché si devono considerare i tempi richiesti dalla componente elettronica per effettuare la commutazione.



Figura 3.12: Esempio di modulazione tramite tecnica PWM bipolare.

Nel caso di portante triangolare bipolare, indicando con  $v_c(t)$  il modulo della portante all'instante t e con  $V_r$  il suo valore di picco, se è rispettata la condizione  $-V_r \leq v_c(t) \leq V_r$ , il valore del *duty cycle* può essere scritto come:

$$dc(t) = \frac{1}{2} + \frac{v_c(t)}{2V_r}$$
(3.5)

Il vantaggio principale introdotto dalla modulazione PWM risiede nella riduzione della potenza dissipata nel circuito limitatore rispetto a circuiti

controllati analogicamente. Infatti, se il segnale PWM assume il valore basso non vi è passaggio di corrente e, quindi, non si hanno perdite. Se invece assume il valore alto, la caduta di tensione è minima e, pertanto, anche la potenza dissipata.

In prima approssimazione, la dinamica di commutazione dei dispositivi elettronici di potenza può essere considerata trascurabile se confrontata con la dinamica del motore elettrico. Questo implica che è possibile descrivere il comportamento del sistema elettronico di potenza come un sistema di ordine zero.

## 3.2.1 Modello di prima approssimazione

In figura 3.13 è mostrato lo schema a blocchi Simulink utilizzato nei giunti del robot in cui si è considerato l'azionamento BLDC (BrushLess DC). In funzione del segnale di comando (q), modulato tramite la tecnica PWM, si alimenta il motore elettrico con una tensione che può assumere i valori +48 Vdc e -48Vdc, in base al senso di rotazione del rotore.



Figura 3.13: Modello Simulink del convertitore DC-DC.

### 3.2.2 Modello di dettaglio

Essendo gli azionamenti dell'UR5 di tipo trifase, è necessario un dispositivo che converta le grandezze elettriche continue presenti nel DC-link in grandezze alternate. Tale dispositivo prende il nome di convertitore DC-AC o

inverter, di cui si riporta uno schema in figura 3.14. Esso si costituisce di una sorgente di tensione continua, che nel caso in esame è costituita dal DC-link, e da tre poli di commutazione bidirezionali, ognuno dei quali è realizzato accoppiando due diodi e altrettanti transistor. Questi ultimi elementi vengono comandati tramite il segnale q, ottenuto dalla modulazione PWM del segnale in tensione in uscita dal controllore di corrente. In ogni polo di commutazione, la presenza della porta logica NOT a monte di uno dei due transistor garantisce che i due elementi di potenza non siano comandati nello stato ON contemporaneamente, in quanto tale condizione porterebbe ad un corto circuito.



Figura 3.14: Schema di un inverter trifase comandato in PWM.

Indicando con O un punto fittizio dell'alimentazione tale da dividere in due componenti uguali la tensione continua di alimentazione, la differenza di tensione tra tale punto e i punti indicati con  $A, B \in C$  può essere scritta come:

$$\begin{cases} v_{AO} = [2q_A(t) - 1] \frac{V_{DC}}{2} \\ v_{BO} = [2q_B(t) - 1] \frac{V_{DC}}{2} \\ v_{CO} = [2q_C(t) - 1] \frac{V_{DC}}{2} \end{cases}$$
(3.6)

Introducendo la tensione di modo comune  $v_{nO}$ , data da:

$$v_{nO} = \frac{1}{3} \left[ v_{AO}(t) + v_{BO}(t) + v_{CO}(t) \right]$$
(3.7)

è possibile calcolare le tensioni applicate alle tre fasi del carico:

$$\begin{cases} v_a(t) = v_{AO}(t) - v_{nO} \\ v_b(t) = v_{BO}(t) - v_{nO} \\ v_c(t) = v_{CO}(t) - v_{nO} \end{cases}$$
(3.8)

Lo schema a blocchi dell'inverter implementato nel modello Simulink dell'UR5 è rappresentato in *figura 3.15*.



Figura 3.15: Modello Simulink dell'inverter trifase.

# 3.3 Azionamento elettrico

Il compito di un motore elettrico è quello di convertire l'energia elettrica prelevata dalla rete in energia magnetica e quest'ultima in energia meccanica [49]. Tale conversione può avvenire sfruttando diversi principi fisici, a seconda della tipologia di azionamento elettrico considerato.

Sia i motori brushless DC, che quelli sincroni a magneti permanenti si costituiscono di uno statore, sul quale si trovano gli avvolgimenti, e di un rotore, dove alloggiano i magneti permanenti (*cfr. figura 3.16*). Alimentando opportunamente gli avvolgimenti si determina un campo magnetico che, interagendo con quello generato dai magneti permanenti, mette in rotazione il rotore, ottenendo in uscita la coppia desiderata.

Mentre nei motori brushless DC si hanno forze contro-elettromotrici aventi andamenti trapezoidali, nei PMSM, distribuendo gli avvolgimenti con legge sinusoidale, si ottengono forme d'onda anch'esse sinusoidali. In generale, un motore sincrono a magneti permanenti garantisce un'efficienza e una coppia maggiore rispetto ad un motore BLDC di pari dimensioni [50].



Figura 3.16: Struttura di un motore sincrono a magneti permanenti [6].

#### 3.3.1 Modello di prima approssimazione

Tale modello, mostrato in *figura 3.17*, prevede in ingresso la tensione di riferimento  $(V_{ref})$ , modulata tramite tecnica PWM, e la velocità angolare del motore (qdm), mentre fornisce in uscita la corrente sugli avvolgimenti (i) e la coppia erogata (T), ottenuta dal prodotto tra la corrente e la costante di coppia del motore  $(k_c)$ .



Figura 3.17: Modello del motore in corrente continua del primo giunto.

Le grandezze caratteristiche dei cinque azionamenti in cui si è considerato il modello in corrente continua sono state estrapolate direttamente dal robot considerando un circuito monofase equivalente. Queste sono riportate in *tabella 3.3*.

Nelle macchine rotanti, il campo magnetico prodotto gioca un ruolo fondamentale nella conversione dell'energia elettrica in energia meccanica [49]. Il funzionamento di un motore elettrico DC può essere descritto considerando le equazioni che governano il comportamento di una spira immersa in un campo magnetico. Applicando una differenza di potenziale ai capi della spira, si genera una corrente che, interagendo con il campo di induzione magnetica, in virtù della legge di Lorenz, determina una forza che dà luogo ad una coppia.

	Size 3 (Base e Gomito)	Size 1 (Polso)
Momento di inerzia $[kgm^2]$ :	$1,877\cdot 10^{-4}$	$2,077\cdot 10^{-5}$
Resistenza $[\Omega]$ :	$0,\!3$	1,65
Induttanza [mH]:	0,83	2,5
Costante di coppia $[Nm/A]$ :	0,1350 (Base) 0,1355 (Gomito)	0,0957 (Polso 1) 0,0865 (Polso 2) 0,0893 (Polso 3)

Tabella 3.3: Grandezze caratteristiche motori DC [15].

In base a quanto descritto, la coppia erogata dal motore può essere scritta come:

$$T_m = k_c \cdot i \tag{3.9}$$

essendo:

- $T_m$ : la coppia motrice erogata dal motore;
- $k_c$ : la costante di coppia, funzione del flusso magnetico, del numero di coppie polari e del numero di spire che costituiscono gli avvolgimenti del motore;
- *i*: la corrente che circola negli avvolgimenti.

Per la legge di Lenz, la rotazione relativa tra un conduttore e un campo magnetico determina una tensione indotta che, sottraendosi alla tensione di armatura, determina una riduzione della corrente rispetto a quella che potrebbe scorrere negli avvolgimenti in assenza di essa. Questa tensione viene detta *forza contro-elettromotrice* ed è pari a:

$$e = k_e \cdot \omega \tag{3.10}$$

Dove  $k_e$  è la costante di tensione e  $\omega$  è la velocità di rotazione.

Modellando la parte elettrica del motore DC tramite un circuito ohmicoinduttivo, scrivendo l'equazione alla maglia si ha:

$$V(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$
(3.11)

essendo:

- V: la tensione di armatura applicata ai capi degli avvolgimenti del motore;
- R: la resistenza equivalente del motore;
- L: l'induttanza equivalente del motore;
- e: la forza contro-elettromotrice.

Ricordando che in ingresso al modello si ha la tensione di armatura e in uscita la coppia erogata dal motore, l'equazione differenziale 3.11 può essere scritta, sfruttando la trasformata di Laplace, tramite la seguente funzione di trasferimento.

$$G(s) = \frac{T_m(s)}{V(s) - e(s)} = k_c \frac{1/R}{L/R \cdot s + 1}$$
(3.12)

Essendo L/R la costante elettrica  $\tau_e$  del motore.

# 3.3.2 Modello di dettaglio

Negli ultimi decenni, lo sviluppo che ha interessato i dispositivi di potenza a semiconduttore, i materiali magnetici e la teoria dei controlli ha portato ad un crescente impiego dei motori sincroni a magneti permanenti in applicazioni *high performance* [51], come, ad esempio, nella robotica.

Come si può vedere dallo schema a blocchi del motore BLAC riportato in *figura 3.18*, l'input del modello è costituito dal segnale di tensione proveniente dall'elettronica di potenza, mentre l'ouput è rappresentato dalla posizione, dalla velocità e dall'accelerazione del rotore.



Descrizione del modello del robot UR5

Figura 3.18: Schema a blocchi del motore sincrono a magneti permanenti.

In particolare, si possono distinguere tre sottosistemi. Il primo, rinominato *Counter-electromotive force computation*, permette di calcolare le forze contro-elettromotrici sulle tre fasi, a partire dalla posizione angolare del rotore, tramite le seguenti espressioni:

$$\begin{cases} e_a = k_e \cos(\theta_e) \dot{\theta}_m \\ e_b = k_e \cos(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \dot{\theta}_m \\ e_c = k_e \cos(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \dot{\theta}_m \end{cases}$$
(3.13)

essendo:

- $e_i$  la forza contro-elettromotrice sulla *j-esima* fase;
- $k_e$  la costante di tensione del motore elettrico;
- $\theta_e$  la posizione angolare elettrica del rotore;
- $\hat{\theta}_m$  la velocità angolare del rotore.

Il secondo sottosistema, chiamato *Current and lost power computation*, è rappresentato in *figura 3.19* e permette di calcolare le correnti sulle tre fasi tramite l'integrazione dell'espressione matriciale *3.14*.



Figura 3.19: Schema a blocchi per la determinazione delle correnti di fase.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right)$$
(3.14)

Essendo:

- $v_i$  la tensione applicata ai capi della i-esima fase;
- $\lambda_i$  il flusso concatenato con la i-esima fase;
- $i_i$  la corrente che scorre sulla i-esima fase;
- $R_i$  la resistenza della i-esima fase;
- $L_{ii}$  l'autoinduttanza della i-esima fase;
- $L_{ij}$  la mutua induttanza tra la i-esima e la j-esima fase.

In generale, la resistenza elettrica e l'induttanza sono funzione dalla temperatura. In molti materiali la resistività ( $\rho$ ), legata alla resistenza tramite la seconda legge di Ohm, varia esponenzialmente al variare della temperatura. Per quanto riguarda il rame, materiale di cui sono costituiti gli avvolgimenti del motore, la relazione tra la resistività e la temperatura (T) può essere rappresentata tramite la seguente espressione lineare [49]:

$$\rho(T) = \rho_0(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \tag{3.15}$$

Essendo  $\rho_0$  la resistività del materiale alla temperatura di riferimento  $T_0$  e  $\alpha$  il coefficiente termico della resistività.

Una relazione analoga può essere scritta anche per l'induttanza, con la differenza che il coefficiente termico assume un valore negativo e, pertanto, ad un incremento di temperatura corrisponderà una sua riduzione.

I coefficienti termici di resistenza e di induttanza per il rame, in corrispondenza di una temperatura pari a 293 K, sono rispettivamente pari a  $3,9 \cdot 10^{-03} K^{-1} e -6,9 \cdot 10^{-04} K^{-1}$ .

Per l'effetto Joule, una corrente I che scorre attraverso un conduttore di resistenza R determina una potenza dissipata  $W_{joule}$ , sotto forma di calore, pari a:

$$W_{joule} = R \cdot I^2 \tag{3.16}$$

Dalle equazioni 3.15 e 3.16 si osserva che la corrente, scorrendo nelle tre fasi, determina un incremento della temperatura, che, a sua volta, comporta

una variazione della resistenza e dell'induttanza. Per determinare i valori assunti, istante per istante, da tali grandezze è necessario conoscere la conduttanza termica tra gli avvolgimenti e il carter  $H_w$  e tra quest'ultimo e l'ambiente esterno  $H_h$ , nonché le capacità termiche degli avvolgimenti e dell'alloggiamento del motore, rispettivamente indicate con  $C_w$  e  $C_h$ . Queste quattro grandezze sono state determinate, in maniera approssimata, sulla base delle informazioni reperibili dal catalogo della casa costruttrice del motore elettrico [52] e tramite considerazioni effettuate sul un giunto Size 3 smontato dal resto del braccio robotico, di cui si riporta una foto in figura 3.20.



Figura 3.20: Giunto Size 3 smontato dal robot UR5.

Nel catalogo degli azionamenti Kollmorgen è riportata la massa dell'intero motore elettrico, mentre dal giunto smontato è possibile pesare la massa del rotore. Sottraendo la seconda alla prima, si può determinare la massa dello statore. In questa trattazione, si è considerata tale massa coincidente con la massa degli avvolgimenti in rame. Per determinare la loro capacità termica si è moltiplicata la massa stimata per il calore specifico del rame. Poiché, durante il funzionamento a regime termico, la temperatura degli avvolgimenti è di circa 150 °C, essendo il calore specifico dipendete dalla temperatura, si è considerato un valore medio valido nel range 18-200 °C. La capacità termica ottenuta e i valori delle grandezze utili per la sua determinazione sono riportati in *tabella 3.4*.

Descrizione	del	modello	del	robot	UR5

Massa motore:	$0,435 \ kg$
Massa statore:	$0,185 \ kg$
Calore specifico rame:	401,08 J/(kg K)
Capacità termica avvolgimenti:	74,20 J/K

Tabella 3.4: Grandezze necessarie per il calcolo della capacità termica degli avvolgimenti.

Essendo gli azionamenti utilizzati dalla Universal Robots di tipo frameless, l'alloggiamento del motore è costituito dal giunto stesso. Per determinare la sua massa, utile per il calcolo della capacità termica, si è supposto che il giunto fosse di alluminio, essendo realizzato con una lega di tale metallo, e si è considerata una geometria semplificata, riportata in figura 3.21, in modo da rendere agevole il calcolo del suo volume. Moltiplicando quest'ultima grandezza per la densità dell'alluminio, si è determinata una stima della massa dell'alloggiamento del motore elettrico. In maniera analoga a quanto fatto precedentemente, dal prodotto tra tale massa e il calore specifico dell'alluminio, si è ottenuta la capacità termica ricercata. Essendo le temperature a cui è sottoposto il giunto considerevolmente minori rispetto a quelle a cui sono soggetti gli avvolgimenti, il valore medio del calore specifico dell'alluminio è stato considerato nel range 18-100 °C. Nella *tabella 3.5* sono riportate le grandezze di cui sopra.



Figura 3.21: Geometria approssimata dell'alloggiamento del motore elettrico.

Volume carter:	$54,06 \cdot 10^{-6} m^3$
Densità alluminio:	$2700 \ kg/m^3$
Massa carter:	$0,146 \ kg$
Calore specifico alluminio:	908,39 J/(kg K)
Capacità termica housing:	132,53 J/K

Descrizione del modello del robot UR5

Tabella 3.5: Grandezze relative alla capacità termica dell'housing.

Per il calcolo della conduttanza termica tra gli avvolgimenti e il carter, si è assunto che lo scambio termico fosse solo di tipo conduttivo, essendo il suo contributo preponderante rispetto a quello fornito dallo scambio convettivo e per irraggiamento. Come si può vedere dalla *figura 3.20*, precedentemente riportata, tra gli avvolgimenti di statore e il carter è presente uno strato di materiale plastico. Considerando per esso una conducibilità termica pari a quella del PVC, e trattandosi di una geometria cilindrica, la conduttanza termica può essere determinata come segue:

$$H_w = \frac{2 \pi \lambda L}{\ln \left(D_e/D_i\right)} \tag{3.17}$$

Essendo:

- $\lambda$  la conducibilità termica del materiale plastico interposto tra il rotore e lo statore;
- L la lunghezza del rotore;
- $D_e$  il diametro esterno del cilindro di materiale plastico;
- $D_i$  il diametro interno del cilindro di materiale plastico.

I valori assunti da tali grandezze sono riportati nella tabella 3.6.

Per il calcolo della conduttanza termica tra il giunto e l'ambiente esterno si è considerato uno scambio termico di tipo convettivo naturale. Tale grandezza può essere calcolata tramite il prodotto tra il coefficiente di scambio termico convettivo dell'aria e l'area interessata da tale scambio. I valori ottenuti sono riportati in *tabella 3.7*.

Determinate le capacità e le conduttanze termiche, è possibile calcolare la temperatura degli avvolgimenti risolvendo il seguente sistema differenziale:

$$\begin{cases} C_w \frac{d(T_w)}{dt} + (T_w - T_h)H_w = W_{joule} \\ C_h \frac{d(T_h)}{dt} + (T_h - T_{ext})H_h = (T_w - T_h)H_h \end{cases}$$
(3.18)

Conducibilità termica PVC:	$0,162 \ W/(K \ m)$
Lunghezza rotore:	$0,03\ m$
Diametro esterno:	$0,076 \ m$
Diametro interno:	$0,074 \ m$
Conduttanza termica:	1,15 W/K

Descrizione del modello del robot UR5

Tabella 3.6: Grandezze relative alla conduttanza termica tra gli avvolgimenti e il carter.

Area di scambio:	$1,48\cdot 10^{-2} m^2$
Coefficiente scambio termico convettivo:	$20 \ W/(Km^2)$
Conduttanza termica:	0,296 W/K

Tabella 3.7: Grandezze relative alla conduttanza termica tra il carter e l'ambiente esterno.

Avendo indicato con  $T_w$ ,  $T_h \in T_{ext}$ , rispettivamente, la temperatura degli avvolgimenti, del carter e dell'ambiente esterno.

Nell'ambiente Simulink, tale sistema viene risolto grazie allo schema a blocchi riportato in *figura 3.22*. La temperatura degli avvolgimenti così ricavata viene fornita in input al modello del motore BLAC in modo da poter calcolare le resistenze e le induttanze di fase.

Il terzo ed ultimo sottosistema presente nel modello del motore elettrico riportato in *figura 3.18*, chiamato *Electromagnetic torque computation*, permette di calcolare la coppia elettromagnetica tramite la moltiplicazione tra le correnti di fase e il rapporto tra le tre forze contro-elettromotrici e la velocità del motore. Tale rapporto costituisce la costante di tensione del motore, il cui valore coincide con quello della costante di coppia.

Sottraendo alla coppia così calcolata la coppia ottenuta dal modello del backlash e quella dovuta allo smorzamento viscoso nei cuscinetti, si ottiene la coppia in uscita dal motore. Dividendo quest'ultima per l'inerzia del rotore, si ricava la sua accelerazione e, tramite successive integrazioni, anche la velocità e la posizione angolare. Queste ultime tre grandezze rappresentano l'output del modello del motore.



Figura 3.22: Schema a blocchi per il calcolo della temperatura degli avvolgimenti.

#### 3.3.3 Parametri elettrici e meccanici

Una delle problematiche principali riscontrate nel presente lavoro è legata alla scarsezza di informazioni relative agli azionamenti elettrici. Universal Robots dichiara soltanto che i motori installati nei suoi bracci robotici sono prodotti dall'azienda statunitense Kollmorgen e che sono stati realizzati a partire dal progetto degli azionamenti della serie KBM.

Anche Kollmorgen non fornisce molte informazioni in merito ai motori prodotti per l'azienda danese. L'unica informazione aggiuntiva riguarda la coppia continua e di picco che sono in grado di fornire gli azionamenti *Size* 0 e *Size* 4. Tali informazioni, riportate in *tabella* 3.8, sono state utilizzate per stimare la coppia erogata dal motore del giunto di spalla (*Size* 3) al fine di individuare, nei cataloghi della casa costruttrice, uno o più motori con caratteristiche elettriche e meccaniche simili a quelli installati sul robot.

Analizzando i prodotti delle serie KBM presenti nel catalogo Kollmorgen si è riscontrato che i motori che permettono di ottenere le coppie richieste

|--|

	Coppia continua [Nm]	Coppia di picco [Nm]
Size 0	1,450	$3,\!445$
Size 4	4,910	12,812

Tabella 3.8: Valori della coppia continua e di picco erogata dai giunti Size 0 e Size 4.

hanno ingombri non compatibili con gli spazi di cui si dispone all'interno del giunto, avendo lunghezze assiali circa due volte maggiori rispetto agli azionamenti installati. Anche le tensioni di alimentazione dei motori KBM non sono coerenti con quelle che si hanno nel robot. Ogni giunto dell'UR5 è alimentato con una tensione al DC-link pari a 48 Vdc che viene convertita in una tensione alternata avente ampiezza massima circa pari a 20 Vac, mentre i motori appartenenti alla serie KBM necessitano di tensioni di alimentazione che vanno da 240 Vac a 480 Vac. Infine, anche il design di questi motori differisce da quelli installati sul robot.

Gli unici azionamenti prodotti da Kollmorgen che prevedono tensioni di alimentazione analoghe a quelle riscontrate sul robot sono quelli appartenenti alla serie TBM. Inoltre, tali motori hanno dimensioni e design compatibili con gli azionamenti installati nei giunti dell'UR5.

In *figura 3.23* si è riportato un esploso del giunto del robot in cui è evidenziato il motore elettrico. Al fine di realizzare un confronto del design tra l'azionamento installato nel braccio robotico e gli azionamenti delle serie KBM e TBM, nella stessa figura sono mostrati anche tali motori.

Per scegliere i parametri da utilizzare nel modello Simulink del motore elettrico si sono dapprima selezionati dei motori candidati dai cataloghi delle serie KBM e TBM in base ai parametri noti o stimabili con buona approssimazione, quali: la coppia continua erogabile, la velocità del motore, la tensione di alimentazione, la corrente massima, le dimensioni.

I motori selezionati in questa prima fase sono riportati in tabella 3.9.

Serie KBM	Serie TBM
14X02-C	7615-A
14X03-B	7631-A

Tabella 3.9: Motori candidati appartenenti alle serie KBM e TBM.



(a) Esploso di un giunto del robot UR



(b) Azionamenti Kollmorgen serie KBM(c) Azionamenti Kollmorgen serie TBMFigura 3.23: Confronto tra gli azionamenti delle serie KBM e TBM [7].

Si vuole evidenziare sin da subito che nessuno dei motori selezionati rispetta tutti i requisiti di cui prima. Questo si può spiegare considerando che i motori utilizzati da Universal Robots sono stati progettati appositamente per le loro applicazioni e, pertanto, nessun motore a catalogo potrà avere le medesime caratteristiche elettriche e meccaniche.

In particolare, entrambi i motori della serie KBM selezionati sviluppano coppie e velocità coerenti con l'azionamento installato nel giunto di spalla dell'UR5, ma, di contro, come detto precedentemente, hanno tensioni di alimentazione, correnti e dimensioni non compatibili. I motori candidati appartenenti alla serie TBM non presentano le difformità manifestate dalla serie KBM, ma erogano delle coppie di poco inferiori a quelle richieste e, inoltre, l'azionamento TBM 7631-A non permette di raggiungere la velocità massima dichiarata da Universal Robots.

A questa prima analisi effettuata sulla base delle informazioni riportate a catalogo ne è seguita una seconda realizzata tramite il modello implementato in ambiente Simulink. I parametri caratteristici di ognuno dei quattro motori selezionati sono stati inseriti nel modello e, dopo aver tarato per ognuno di essi i controllori di corrente, velocità e posizione, si è verificata la bontà dei risultati ottenuti. Entrambi i motori della serie KBM non permettono di sviluppare le correnti necessarie al sistema per avere una sovrapposizione tra le grandezze di set e quelle di feedback. Per quanto riguarda i motori della serie TBM, il modello 7631-A, avendo una costante di tensione  $k_e$  relativamente elevata, non permette il raggiungimento della velocità massima del giunto, pari a 180°/s. Per queste ragioni si è optato per utilizzare il modello 7615-A che garantisce una risposta del sistema soddisfacente.

In tabella 3.10 sono riportate le grandezze caratteristiche del motore scelto.

Corrente continua [Arms]:	8,57
Costante di tensione $[V/(rad/s)]$ :	0,093
Resistenza $[\Omega]$ :	0,370
Induttanza [mH]:	0,40
Inerzia $[kgm^2]$ :	$3,04\cdot 10^{-5}$
<b>Peso</b> [kg]:	0,435
Smorzamento viscoso [Nm/(rad/s)]	$5,78 \cdot 10^{-5}$
Numero di coppie polari [–]:	6

Tabella 3.10: Grandezze caratteristiche motore TBM 7615-A.

# **3.4** Riduttore armonico

In [15] il riduttore armonico installato nei giunti del robot è modellato tramite il prodotto tra il rapporto di trasmissione  $\tau$ , pari a 101, e il rendimento  $\eta$ , supposto pari a 0,80 in accordo con [53], ottenendo una coppia T all'uscita dal giunto data da:

$$T = T_m \cdot \tau \cdot \eta \tag{3.19}$$

In un accoppiamento tra ruote dentate, quando si applica una coppia alla ruota motrice, prima che questa possa essere trasmessa alla ruota condotta, è necessario recuperare il gioco, o *backlash*, esistente tra i denti in presa.

Idealmente, se i denti sono realizzati seguendo il proporzionamento standard, l'ingranamento dovrebbe avvenire in assenza di gioco, pertanto, il *bac*- klash, indicato con j in figura 3.24, rappresenta l'errore dato dalla differenza tra la larghezza del vano e lo spessore del dente [8].



Figura 3.24: Backlash tra due ruote dentate [8].

La presenza del *backlash* nelle trasmissioni introduce delle non linearità che determinano una riduzione dell'efficienza nel controllo di velocità e di posizione [54]. Migliorando il modello del riduttore proposto in [15] in modo da tener conto di tale fenomeno, è possibile ottenere delle simulazioni più fedeli. Inoltre, una modellazione più accurata del riduttore permette di simulare la presenza di guasti in tale dispositivo, così da poter effettuare degli studi di carattere diagnostico e prognostico.

In letteratura sono presenti diversi modelli che permettono di simulare gli effetti del *backlash*. In questa trattazione si è considerata la modellazione proposta in [55, 56] in cui si assimila la trasmissione ad un albero privo di massa, avente costante elastica k e coefficiente di smorzamento c. In particolare, indicando  $\theta_d \in \dot{\theta}_d$ , rispettivamente, la posizione e la velocità relativa delle due ruote e con  $\alpha$  il gioco massimo tra i denti, la coppia all'uscita del riduttore può essere scritta nel seguente modo [54]:

$$T = \begin{cases} 0 \text{ or } k(\theta_d - \alpha) + c\dot{\theta}_d & \theta_d > \alpha \\ 0 \text{ or } k(\theta_d - \alpha) + c\dot{\theta}_d & \theta_d < -\alpha \\ 0 & |\theta_d| \le -\alpha \end{cases}$$
(3.20)

La semplificazione di non considerare la massa dell'albero, in base a quanto riportato in [57], è accettabile se si possono trascurare gli effetti del rumore e delle vibrazioni.

Durante il funzionamento dell'ingranamento, nel caso ideale in cui il gioco tra le due dentature è nullo (figura 3.25-a), si ha sempre la trasmissione della coppia applicata alla ruota motrice. Se invece, come accade nella realtà, è presente un gioco non nullo, si possono distinguere tre diverse condizioni:

- Contatto tra i denti (rotazione in senso orario): la ruota motrice ruota in senso orario e si ha il contatto tra i fianchi dei denti delle due ruote (*figura 3.25-b*). Questa condizione garantisce la trasmissione della coppia all'albero su cui è calettata la ruota condotta.
- Contatto tra i denti (rotazione in senso antiorario): è analogo al caso precedente, ma con verso di rotazione opposto (*figura 3.25-c*).
- Assenza di contatto: durante le inversioni del senso di rotazione, è necessario recuperare il gioco presente. In questa fase, non essendoci contatto, non ci sarà trasmissione di coppia (*figura 3.25-d*).



Figura 3.25: Posizioni relative dei denti della ruota motrice (M) e della ruota condotta (C).

Nel modello Simulink del robot, le configurazioni di cui sopra sono state implementate usando dei blocchi che, sfruttano la medesima logica degli *ifelse statement*, permettono di passare da una condizione all'altra in base al valore della posizione relativa delle due ruote, in accordo con l'equazione 3.20.

#### 3.4.1 Modello di attrito

Le parti in movimento del braccio robotico sono inevitabilmente soggette all'azione dell'attrito. Questo determina una perdita di efficienza della macchina e un peggioramento delle prestazioni del sistema di controllo.

Nel modello dell'UR5, per tener conto delle coppie di attrito a cui sono sottoposti i singoli giunti, si è scelto di concentrare tutti i loro effetti nei relativi riduttori. Al fine di rappresentare fedelmente tali azioni resistenti, è necessario identificarne i parametri caratteristi e realizzare una modellazione quanto più accurata possibile. Riprendendo la metodologia riportata in [58, 59], l'identificazione dei parametri dinamici del robot in esame, e, pertanto, anche dei coefficienti di attrito, è stata realizzata imponendo ad ogni giunto una traiettoria periodica ricavata tramite una serie di Fourier del quinto ordine. Dopo aver sollecitato il braccio robotico in tal modo, i parametri di interesse sono stati estratti grazie al metodo dei minimi quadrati. Considerata la loro dipendenza dalla temperatura, si è condotta una campagna sperimentale con lo scopo di determinare i valori assunti al variare di questa. In particolare, come si può vedere dalle *figure 3.26* e *3.27*, il coefficiente di attrito viscoso dei sei giunti si riduce, con legge quasi lineare, al crescere della temperatura, mentre quello relativo all'attrito coulombiano è debolmente influenzato da questa grandezza, rimando circa costante.



Figura 3.26: Andamento del coefficiente di attrito viscoso nei sei giunti dell'UR5 in funzione della temperatura.

Come si è già riportato in precedenza, al fine di creare il database necessario per l'estrazione delle *feature* relative allo stato di salute del manipolatore in esame, si devono effettuare un numero sufficientemente elevato di simulazioni, tale da essere significative dal punto di vista statistico. Queste riproducono il funzionamento del robot per un intervallo di tempo limitato, inferiore a 10 secondi. Durante questo lasso di tempo, la temperatura del giunto è soggetta a variazioni dell'ordine del decimo di grado Celsius e, pertanto, si potrebbe considerare costante. Con l'obiettivo di rendere il



Figura 3.27: Andamento del coefficiente di attrito coulombiano nei sei giunti dell'UR5 in funzione della temperatura.

modello valido anche per simulazioni più lunghe rispetto a quelle effettuate, si è scelto di considerare tale variazione, nonché quella dei coefficienti di attrito coulombiano e viscoso. I valori di questi ultimi sono stati ricavati sfruttando le funzioni MATLAB *polyfit* e *polyval*, grazie alle quali è possibile realizzare un'interpolazione polinomiale dei valori ottenuti dalla campagna sperimentale.

In generale, l'andamento della coppia di attrito tra due superfici lubrificate può essere approssimato tramite la curva di Stribeck. Come si può vedere dalla *figura 3.28*, si possono distinguere diversi regimi di lubrificazione in funzione della velocità relativa tra le due superfici a contatto [9]:

- attrito statico: rappresenta la soglia che la coppia deve superare affinché si possa innescare il moto relativo;
- lubrificazione limite: si ha quando la velocità relativa è troppo bassa affinché si possa instaurare un film di lubrificante tra le due superfici;
- lubrificazione mista: il contatto è supportato in parte dalla forza idrodinamica e in parte dalle asperità delle due superfici;
- lubrificazione idrodinamica: il contatto solido-solido è eliminato, pertanto si è in regime completamente viscoso. Questa condizione non sempre si verifica.


Figura 3.28: Generico andamento della curva di Stribeck [9].

Una modellazione esatta della curva di Stribeck risulta molto complessa, pertanto, al fine di ottenere una modellazione degli effetti dell'attrito semplice e allo stesso tempo accurata, si è approssimata tale curva tramite una funzione dipendente dai coefficienti di attrito statico, coulombiano e viscoso, che, coerentemente con quanto riportato sopra, variano durante la simulazione in funzione della temperatura del giunto.

$$T_f = (T_{f,s} - T_{f,c}) \cdot [1 - \tanh(10 \cdot \omega)] + T_{f,c} + f_v \cdot \omega$$
 (3.21)

Essendo:

- $T_f$  la coppia di attrito complessiva a cui è sottoposto il giunto;
- $T_{f,s}$  la coppia di attrito statico;
- $T_{f,c}$  la coppia di attrito coulombiano;
- $f_v$  il coefficiente di attrito viscoso;
- $\omega$  la velocità angolare del giunto.

Dall'espressione 3.21, si osserva che la coppia di attrito  $T_f$  non è calcolata utilizzando la velocità relativa tra le due ruote, bensì tramite la velocità del giunto. Questo è dovuto al fatto che i parametri di attrito sono stati determinati tramite un modello matematico che sfrutta la velocità  $\omega$ , anziché quella relativa. Questo algoritmo ha permesso di ricavare i parametri di attrito coulombiano e viscoso di ogni giunto, mentre, non avendo informazioni in merito all'attrito statico, si è fatto uso della seguente espressione empirica per determinare la coppia limite che bisogna superare affinché si inneschi il moto:

$$T_{f,s} = 1,5T_{f,c} \tag{3.22}$$

Un esempio dell'andamento di tale curva, relativa al *polso 3*, è riportato in *figura 3.29*.



Figura 3.29: Andamento della coppia di attrito  $(T_f)$  in funzione della velocità angolare nel sesto giunto  $(\omega)$ .

Il modello Simulink è stato realizzato in modo da simulare l'azione dell'attrito in regime statico e dinamico, nonché la discontinuità tra di essi. In particolare, con riferimento allo schema a blocchi riportato in figura 3.30, in corrispondenza di velocità del giunto prossime a zero, si simulano le condizioni di attrito statico, mentre per velocità maggiori si considera un attrito di tipo coulombiano e viscoso. Avendo i calcolatori una precisione finita, non è possibile definire una velocità esattamente nulla. Pertanto, all'interno dello schema, si è inserito un elemento che permettesse di individuare quando il giunto si trova in tale condizione. Inizialmente, si è fatto uso del blocco Simulink *Hit Crossing*, grazie al quale è possibile avere una precisione prossima all'epsilon di macchina. Tale blocco però, in talune simulazioni, ha indotto instabilità nel sistema, dunque, è stato sostituito con una funzione di soglia che permette di individuare quando la velocità è minore di  $10^{-6}$ rad/s. L'utilizzo della funzione di soglia ha permesso di ridurre del 25% i tempi di calcolo necessari per l'individuazione della condizione di attrito statico.

Inoltre, il modello permette di discernere la condizione di attrito statico stabile dalla condizione di *stuck*, ovvero quella condizione in cui la coppia attiva è tale da determinare un'accelerazione del giunto non nulla al passo di integrazione successivo. Questo avviene tramite il blocco *Minimo* in cui si confrontano la coppia attiva e la coppia di attrito limite.

Determinata la coppia di attrito  $T_f$ , sottraendola alla coppia attiva C, si ottiene la coppia utile  $T_u$  che permette di muovere i giunti.

$$T_u = C - T_f \tag{3.23}$$



Figura 3.30: Schema a blocchi del modello di attrito.

### 3.4.2 Modello di degrado

Per poter effettuare delle previsioni sullo stato di salute futuro del riduttore armonico è necessario innanzitutto quantificare il gioco presente tra la dentatura del *flexspline* e del *circular spline* e, successivamente, stimare il volume di materiale asportato a causa del processo di usura in relazione al tempo e alle condizioni di funzionamento. A tal fine è necessario introdurre un modello di degrado dell'*harmonic drive*.

Il volume del materiale asportato da due superfici a contatto e in moto relativo può essere determinato tramite l'equazione di Archard [60]:

$$Q = \frac{K L W}{H} \tag{3.24}$$

essendo:

- Q: il volume di materiale asportato;
- K: il coefficiente adimensionale di usura;
- L: la distanza di strisciamento;
- W: la forza di contatto;
- *H*: la durezza del materiale meno duro tra i due.

In base a quanto riportato in [61], l'equazione (3.24), nel caso di ruote dentate cilindriche, può essere riscritta come segue:

$$h(x) = \int_{t_{in}}^{t_{out}} k \ p(x,t) \ V_s \ dt$$
(3.25)

essendo:

- h: lo spessore del materiale asportato dalla superficie del dente;
- x: la distanza dal *pitch* point<sup>5</sup>;
- $t_{in}$  e  $t_{out}$ : l'instante in cui il dente considerato in presa e quello in cui avviene il rilascio;
- k: il coefficiente di usura, espresso in  $Pa^{-1}$ ;
- $V_s$ : la velocità di strisciamento dei due denti.

 $<sup>{}^{5}</sup>$ Il *pitch point* corrisponde al punto di contatto delle circonferenze primitive delle due ruote dentate.

In assenza di un modello che permetta di simulare il contatto tra i singoli denti ed essendo questo studio finalizzato alla determinazione della fattibilità dell'implementazione di un sistema di diagnostica e prognostica in campo robotico, si considereranno le seguenti ipotesi:

- 1. la pressione esercitata tra i denti in presa è distribuita uniformemente su tutta la superficie a contatto;
- la pressione di contatto è distribuita in egual misura su tutti i denti in presa;
- 3. il coefficiente di usura è costante.

Sotto tali ipotesi, la pressione di contatto, divenuta indipendente dalla coordinata x e dal tempo t, può essere determinata nel seguente modo:

$$p = \frac{T}{\rho_i \cos(\theta) S_c z} \tag{3.26}$$

essendo T la coppia trasmessa,  $\rho_i$  la distanza tra il centro del *wave-generator* e la base del dente,  $\theta$  l'angolo di pressione (pari a 20°),  $S_c$  l'area di contatto tra due denti in presa, z il numero di denti contemporaneamente in presa pari, in base a quanto riportato in [45, 62], al 25-35% del totale. Nel caso in esame, considerando una percentuale del 30%, si è ottenuto un numero di denti pari a sessanta.

La velocità di strisciamento tra i due fianchi è stata determinata tramite:

$$V_s = \omega_{WG} \ \rho_i \ \sin(\gamma_i) \tag{3.27}$$

dove  $\omega_{WG}$  e  $\gamma_i$  rappresentano, rispettivamente, la velocità angolare del wave-generator e l'angolo compreso tra il sistema di riferimento radiale  $(X_i - Y_i)$  e quello tangenziale  $(X_{T_i} - Y_{T_i})$  (crf. figura 3.31). Tale angolo è definito come:

$$\gamma_i = \alpha_{R_i} - \alpha_{N_i} \tag{3.28}$$

dove:

$$\begin{cases} \tan(\alpha_{R_i}) = \frac{y_i}{x_i}\\ \tan(\alpha_{N_i}) = \frac{b^2 y_i}{a^2 x_i} \end{cases}$$
(3.29)

ed essendo:

$$\begin{cases} x_i = b \sin(\varphi_i) \\ y_i = a \cos(\varphi_i) \end{cases}$$
(3.30)

avendo indicato con a e b, rispettivamente, il semiasse maggiore e minore dell'ellisse e con  $\varphi_i$  l'angolo compreso tra l'asse  $Y_0$  e la congiungente tra il centro del *wave-generator* e la base del dente considerato.



Figura 3.31: Schema degli angoli caratteristici del contatto tra denti in un riduttore armonico.

### 3.5 Dinamica

In questo paragrafo è descritta la dinamica del manipolatore UR5, nonché la sua modellazione all'interno dello schema a blocchi Simulink. Quest'ultima è stata realizzata sfruttando l'ambiente *Simscape Multibody*, che consente di simulare sistemi *multibody* tramite blocchi rappresentanti corpi, giunti, vincoli, elementi di forza e sensori. Definito il sistema meccanico completo, l'ambiente di simulazione provvede a formulare e risolvere le equazioni del moto in maniera automatica. Inoltre, importando delle geometrie CAD 3D, è possibile visualizzare la dinamica del sistema [63]. Una rappresentazione 3D dell'UR5 ottenuta tramite l'ambiente *Simscape Multibody* è riportata in *figura 3.32*.

La traiettoria percorsa dall'*end-effector* è data dalla composizione dei moti dei sei link del robot, che, a loro volta, vengono movimentati grazie alle coppie generate dai relativi giunti. Ogni link è supportato dalla forza e dalla coppia di reazione esercitata da quello precedente ed è soggetto alla propria forza peso, nonché alla forza e alla coppia di reazione del link successivo. Affinché il robot segua la traiettoria desiderata è necessario compensare



Figura 3.32: Rappresentazione 3D del robot UR5 in ambiente Simscape Multibody.

adeguatamente gli effetti dell'attrito, della forza di gravità, della variazione delle inerzie e di eventuali disturbi esterni. In [64] l'equazione della dinamica del robot è scritta in forma compatta sfruttando una rappresentazione matriciale. Supponendo nulle le azioni esterne, si ha:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})$$
(3.31)

Essendo:

- **q**, **q̇**, e **q̈**, rispettivamente, i vettori generalizzati delle coordinate, della velocità e dell'accelerazione del giunto;
- **Q** il vettore delle forze generalizzate dell'attuatore associate alle coordinate generalizzate **q**;
- M la matrice di inerzia del giunto;
- C la matrice di Coriolis e delle coppie centripete;
- F la matrice delle forze di attrito;
- G la matrice dei carichi dovuti all'accelerazione di gravità;

La risoluzione di tale equazione permette di ricavare le coppie necessarie per ottenere una determinata posizione, velocità e accelerazione del robot, questo problema prende il nome di *dinamica inversa*. L'equazione 3.31 può essere ricavata tramite i classici metodi della dinamica, quali: la seconda legge di Newton, l'equazione del moto di Eulero o l'approccio energetico di Lagrange. Un modo particolarmente efficiente dal punto di vista computazionale per risolverla è quello di utilizzare l'algoritmo ricorsivo di Newton-Eulero, che, di contro, non permette di ottenere le equazioni del moto in forma chiusa. Questo approccio prevede di determinare le velocità e le accelerazioni dei link, note le analoghe grandezze dei giunti, a partire dalla base del robot.

Come riportato in [64], gli elementi delle matrici  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{F} \in \mathbf{G}$  sono funzioni dei parametri cinematici e di inerzia dei link.

La cinematica del robot può essere determinata sfruttando la convezione di Denavit-Hartenberg (D-H). In particolare, considerando un sistema di riferimento mobile solidale ad ogni link, tramite la successiva moltiplicazione delle relative matrici di rototraslazione, è possibile determinare la posizione relativa dell'end-effector rispetto al sistema di riferimento fisso al telaio. I parametri di D-H sono costituiti da una quaterna di valori e permettono di determinare la posizione e l'orientamento di due membri consecutivi. Con riferimento alla simbologia mostrata in figura 3.33, i suddetti parametri sono definiti come di seguito:

- $a_i$ : rappresenta la distanza tra  $O_{i'}$  e  $O_i$  misurata lungo la direzione positiva dell'asse  $x_{i'}$ ;
- $d_i$ : indica la distanza tra  $O_{i-1} \in O_{i'}$  misurata lungo la direzione positiva dell'asse  $z_{i-1}$ ;
- $\alpha_i$ : è l'angolo tra gli assi  $z_{i-1}$  e  $z_i$  e rappresenta la rotazione in senso antiorario attorno all'asse  $x_i$  necessaria all'asse  $z_{i-1}$  affinché si allinei con l'asse  $z_i$ ;
- $\theta_i$ : è l'angolo tra gli assi  $x_{i-1}$  e  $x_i$  e rappresenta la rotazione in senso antiorario attorno all'asse  $z_i$  necessaria all'asse  $x_{i-1}$  affinché si allinei con l'asse  $x_i$ .

In *tabella 3.11* sono riportati i parametri di D-H fornita da Universal Robots per il manipolatore UR5 [65].

Descrizione del modello del robot UR5



Figura 3.33: Schema del collegamento tra due link di un manipolatore [10].

	$\mathbf{a_i} \ [m]$	$\mathbf{d_i} \; [m]$	$\alpha_{\mathbf{i}} \; [\mathrm{rad}]$	$\theta_{\mathbf{i}} \; [\mathrm{rad}]$
Base:	0	$0,\!089159$	$\pi/2$	0
Shoulder:	-0,425	0	0	0
Elbow:	-0,39225	0	0	0
Wrist 1:	0	0,10915	$\pi/2$	0
Wrist 2:	0	0,09465	$-\pi/2$	0
Wrist 3:	0	0,0823	0	0

Tabella 3.11: Parametri di D-H del robot UR5.

Noti tali parametri, è possibile definire la matrice di rototraslazione che permette il passaggio dal sistema di riferimento del giunto i - 1 a quello del giunto successivo:

$$A_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.32)

Per quanto riguarda i parametri di inerzia, ogni membro ne possiede dieci indipendenti tra di loro: la massa del link, le coordinate del centro di massa riferite al sistema di riferimento solidale al membro considerato e sei momenti di inerzia. Mentre la massa dei link e le coordinate dei centri di massa sono fornite dalla casa costruttrice del robot, i momenti di inerzia dei vari link sono stati stimati tramite l'operazione di identificazione dei parametri dinamici descritta nel paragrafo 3.4.1. I valori forniti da Universal Robots sono riportati in *tabella 3.12* [65].

	$\begin{array}{c} \mathbf{Massa} \\ [\mathrm{kg}] \end{array}$	Coordinate del centro di massa [m]
Link 1	$^{3,7}$	$[0 -0.02561 \ 0.00193]$
Link 2	8,393	$[0,2125 \ 0 \ 0,11336]$
Link 3	2,33	$[0,15 \ 0 \ 0,0265]$
Link 4	1,219	$[0 - 0.0018 \ 0.01634]$
Link 5	1,219	$[0 \ 0,0018 \ 0,01634]$
Link 6	0,1879	$[0 \ 0 \ -0,001159]$

Tabella 3.12: Massa e coordinate del centro di massa dei link del robot UR5.

Con riferimento all'equazione 3.31, il termine che generalmente risulta essere preponderante è quello relativo alla forza di gravità  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ . Questo si presenta come un vettore avente tanti elementi quanti sono i membri del manipolatore. La coppia che i giunti devono esercitare per contrastare l'azione della forza di gravità è fortemente dipendente dalla posizione assunta dal robot. Ad esempio, la coppia generata dal giunto di spalla dovrà essere maggiore quando il robot assume una configurazione orizzontale piuttosto che una verticale. La matrice di inerzia  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  è simmetrica, definita positiva e funzione della posizione assunta dal braccio robotico. In particolare, gli elementi della diagonale principale rappresentano i momenti di inerzia dei link, mentre gli elementi al di fuori di essa i loro prodotti di inerzia. La matrice  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  permette di considerare l'effetto della forza di Coriolis e della coppia centripeta. In particolare, la prima è direttamente proporzionale al prodotto tra le velocità dei giunti, mentre la seconda al quadrato della loro velocità. Nei manipolatori azionati elettricamente, in genere, il contributo della forza d'attrito  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$  risulta essere quello preponderante dopo quello relativo alla forza di gravità. Come riportato nel paragrafo 3.4.1, essendo l'attrito di tipo coulombiano e viscoso, la sua azione è funzione della velocità del giunto.

Mentre con la *dinamica inversa* è possibile determinare le coppie necessarie affinché il manipolatore segua una determinata traiettoria, al contrario, la *dinamica diretta* permette di determinarne il moto a partire dalle coppie esercitate dai giunti. In particolare, essendo la matrice delle inerzie invertibile, con riferimento alla simbologia definita precedentemente, si può scrivere:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \left( \mathbf{Q} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{q}) \right)$$
(3.33)

Come si può vedere dalla *figura 3.34*, a monte del modello Simscape sono presenti tre blocchi:

- Solver Configuration: necessario in ogni sistema fisico modellato tramite Simscape in quanto contiene i parametri utili per eseguire la simulazione;
- World Frame: permette di definire il sistema di riferimento globale del modello, gli assi sono tra loro ortogonali e orientati secondo la regola della mano destra;
- Mechanism Configuration: permette la definizione di parametri meccanici e di simulazione utili al modello, come ad esempio l'accelerazione di gravità.

Dopo tali blocchi è presente un elemento *Solid*, indicato con *Ground*, che permette di simulare il piano d'appoggio su cui è fissato il braccio robotico. Fissaggio che avviene tramite un *Welding Joint*, ovvero un vicolo privo di gradi di libertà.

Successivamente, il modello si costituisce di sei sottosistemi, ognuno rappresentante un giunto. Come riportato in figura 3.35, ogni sottosistema riceve in ingresso un coppia (T) e fornisce in uscita la posizione (q), la velocità (qd) e l'accelerazione (qdd) del giunto calcolate dall'ambiente di simulazione risolvendo le equazioni del moto. Oltre alle porte relative all'ingresso della coppia e all'uscita delle grandezze cinematiche, si hanno due porte che permettono di definire il link precedente e quello successivo. Il giunto è modellato tramite il blocco *Revolute Joint*, caratterizzato da un unico grado di libertà di rotazione. Nel modello, questo blocco è preceduto da una rotazione e da una traslazione rigide, definite tramite i parametri di Denavit-Hartenberg, in modo da cambiare il sistema di riferimento.



Figura 3.34: Schema a blocchi del modello dinamico del robot UR5.



Figura 3.35: Schema a blocchi del primo giunto.

### 3.6 Sensori

I sensori modellati nello schema a blocchi del robot UR5 sono: i resolver, che permettono di misurare le coordinate dei giunti, gli encoder ottici, che consentono la misurazione delle velocità dei motori, e i sensori di corrente, grazie ai qual è possibile conoscere l'entità delle correnti che scorrono negli avvolgimenti degli azionamenti elettrici.

Ognuno di essi riceve in input la relativa grandezza fisica proveniente dal giunto e fornisce in output il corrispondente valore filtrato e digitalizzato, che permette la chiusura dell'anello di controllo.

Al fine di ottenere una risposta del modello quanto più prossima a quella del robot, per filtrare le grandezze provenienti dai giunti si sono considerate delle funzioni di trasferimento del primo ordine, nei sensori di corrente e del secondo ordine, nei sensori di velocità e posizione. Considerando le loro forme canoniche, rispettivamente:

$$H(s) = \frac{K}{\tau \ s+1} \tag{3.34}$$

e:

$$H(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$
(3.35)

si è posto:

• il guadagno statico K unitario in tutte e tre tipologie di sensori. Tale scelta è dettata dal fatto che non si è realizzata una descrizione formale della scheda di acquisizione, la quale avrebbe portato ad una conversione del segnale acquisito nel range normalizzato  $\pm 10 V$  e, di conseguenza, all'introduzione di un guadagno statico diverso da uno;

- la costante di tempo  $\tau$  nelle funzioni di trasferimento del primo ordine pari a  $1/(4000\pi) s$ , che corrisponde ad una frequenza di taglio di 2000 Hz;
- la pulsazione naturale  $\omega_n$  nei sensori di velocità e posizione, rispettivamente, pari a 7695 e 445 rad/s;
- il fattore di smorzamento  $\zeta$ nei due anelli più esterni pari a0,8.

Nelle figure 3.36, 3.37 e 3.38 si riportano le tre risposte in frequenza ottenute.



Current sensor's frequency response

Figura 3.36: Risposta in frequenza del sensore di corrente.

Descrizione del modello del robot UR5



Figura 3.37: Risposta in frequenza del sensore di velocità.



Figura 3.38: Risposta in frequenza del sensore di posizione.

I segnali ottenuti a valle del filtro sono di tipo analogico, pertanto, per poter essere elaborati dal microprocessore della logica di controllo, è necessario digitalizzarli. In generale, tale conversione si costituisce di quattro operazioni: il campionamento, il mantenimento, la quantizzazione in ampiezza e la codifica. Le prime due vengono realizzate tramite il circuito di Sample and Hold, il quale campiona il segnale analogico in un treno di impulsi modulati in ampiezza e mantiene il suo valore per un determinato periodo di tempo, sufficientemente piccolo da garantire una riproduzione fedele del segnale analogico originario. A valle di tale dispositivo, il quantizzatore ha il compito di approssimare i valori assunti dal segnale ricevuto in ingresso. Infatti, mentre un segnale analogico può assumere infiniti valori, variando tra il limite massimo e quello minimo, i segnali digitali possono assumere solo  $2^N$  valori, essendo N il numero di bit del convertitore A/D. In particolare, l'errore introdotto dal processo di digitalizzazione è compreso tra 0 e  $\pm Q/2$ , dove Q è il livello di quantizzazione, definito come:

$$Q = \frac{FSR}{2^N} \tag{3.36}$$

essendo FSR il Full Scale Range. Infine, la codifica permette di tradurre i valori del segnale campionato e quantizzato in delle parole, o word. Al valore inferiore della grandezza in esame si associa una word avente tanti zeri quanti sono i bit del convertitore, mentre ai successivi si assegnano delle parole ordinate in modo crescente in base al sistema numerico binario [66].

Come si può vedere dalla *figura 3.39*, in questa trattazione le operazioni di *Sample and Hold* e di quantizzazione sono effettuate sfruttando, rispettivamente, i blocchi Simulink *Zero-Order Hold* e *Quantizer*, mentre non si è tenuto conto dell'operazione di codifica.

Sono disponibili anche modelli più sofisticati dello Zero-Order, detti higher order, come ad esempio il First-Order e il Second-Order Hold. Tali algoritmi permettono di ricostruire il segnale originario con maggior precisione, ma possono presentare alcuni svantaggi. Ad esempio, i blocchi First-Order Hold possono generare errori considerevoli se il segnale analogico è soggetto ad elevate variazioni nel tempo. Questo è dovuto al fatto che esso memorizza il valore assunto dal campione precedente e da quello attuale per determinare la pendenza da utilizzare nel campione successivo [67].

Per tenere conto del rumore presente nella catena di misura del robot, nello schema a blocchi dei sensori si è introdotta una distribuzione uniforme di numeri casuali. In particolare, l'ampiezza di tale segnale oscillante è stata determinata calcolando la varianza tra i segnali misurati dal robot e quelli ottenuti elaborando questi ultimi con un filtro Butterworth del primo ordine. Tale filtro permette di ottenere una risposta di ampiezza molto piatta nella banda passante e una buona attenuazione nella banda di transizione [67]. Infine, la frequenza del segnale randomico è stata determinata tramite la funzione Matlab *Fast Fourier transform* che permette di visualizzare lo spettro in frequenza del segnale fornito.



Figura 3.39: Modello Simulink del sensore di velocità del primo giunto.

#### 3.6.1 Modello di dettaglio

Come riportato all'inizio del presente capitolo, l'unico dei sensori presenti nello schema a blocchi del manipolatore la cui modellazione è soggetta a modifiche, a seguito dell'introduzione del motore trifase, è quello di corrente.

Come mostrato in *figura 3.40*, la differenze rispetto al caso monofase risiede nella necessità di convertire le correnti riferite agli assi trifase  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  nel sistema di riferimento  $\vec{d}, \vec{q}, 0$ , sfruttando la trasformata di Park. Grazie ad essa si ottiene una notevole semplificazione della logica controllo, regolando due grandezze continue anziché tre alternate.



Figura 3.40: Modello trifase del sensore di corrente.

### Capitolo 4

## Analisi *model-based* degli effetti del gioco nel riduttore armonico

L'accuratezza e la ripetibilità sono grandezze fondamentali per la corretta esecuzione delle operazioni per i quali sono programmati i robot. Per assicurare il mantenimento di prestazioni prossime a quelle nominali, la capacità di rilevare l'insorgenza dei guasti nei loro primi stadi gioca un ruolo cruciale [68]. In generale, l'unità di controllo non è in grado di rilevare i guasti fintanto che non inducono degli errori superiori a determinate soglie ritenute critiche [69]. Un modo per individuarli è quello di utilizzare dei sensori aggiuntivi, integrati nel robot o esterni, capaci di rilevare anomalie nel comportamento della macchina con maggior precisione rispetto all'unità di controllo. Di contro, questa soluzione porta ad un incremento dei costi, della complessità del *setup*, del peso e degli ingombri<sup>6</sup> [70].

L'alternativa proposta nel presente lavoro di tesi è quella di utilizzare un sistema di diagnostica che, sfruttando i segnali estraibili dal robot, permetta di rilevare la presenza dei guasti. Questo, congiuntamente ad un modello in grado di simulare il processo di degradazione, dà la possibilità di stimare la vita utile residua del componente danneggiato, consentendo un'efficace gestione dell'attività manutentiva e del magazzino.

In assenza di sensori supplementari, i segnali estraibili dai robot sono generalmente gli stessi, indipendentemente dalla casa costruttrice. Dunque, la metodologia implementata considerando l'UR5 assume un carattere generale e, pertanto, utilizzabile anche per altri robot.

 $<sup>^{6}</sup>$ In molte applicazioni industriali i robot si muovono in spazzi ristretti rendendo impossibile l'istallazione di strumentazione esterna. Il caso più emblematico è quello dei robot di saldatura utilizzati nel settore *automotive*.

Come riportato in [26], i giunti sono costituiti da cinque sistemi principali: l'elettronica, i sensori, il motore elettrico, il riduttore e i cuscinetti. Nei primi tre l'insorgenza di un'avaria è facilmente individuabile dalla logica di controllo grazie allo scostamento dei relativi segnali rispetto a quelli attesi. Questo non si verifica nei componenti meccanici. Ad esempio, l'usura dei cuscinetti, manifestandosi tramite un incremento della forza di attrito, viene compensata fornendo all'azionamento una corrente di alimentazione maggiore. Così facendo, sebbene venga assicurata la corretta esecuzione della traiettoria, la macchina opererà in condizioni degradate, rappresentando un possibile rischio. Per quanto riguarda il riduttore, considerato il suo ruolo chiave nel corretto funzionamento della macchina, anche una lieve degradazione può comprometterne l'operabilità.

In questa prima fase di studio, si è considerata un'unica modalità di guasto rappresentata dalla presenza di gioco nel riduttore armonico del giunto di spalla. In base a quanto riportato in [44], il gioco radiale dell'*harmonic* drive utilizzato da Universal Robots nel giunto preso in esame, nelle condizioni di fabbrica, è minore di  $1, 67 \cdot 10^{-2}$  gradi. Durante il funzionamento, lo sfregamento tra i denti del flexspline e del circular spline determina un fenomeno abrasivo, con conseguente rimozione di materiale, che porta ad un progressivo incremento del gioco radiale. In [26] è riportata una vista al microscopio della dentatura del flexspline (figura 4.1) dove è ben visibile l'erosione del metallo dovuta al fenomeno sopra citato. In particolare, si osserva una distribuzione non omogenea dell'usura lungo i denti: molto marcata in corrispondenza della sezione di ingresso, essendo sottoposta alla deformazione ellittica indotta dal wave-generator, e poco visibile nella sezione di uscita, non soggetta alla deformazione.

Altri fattori che possono introdurre del gioco nel giunto, in misura minore rispetto al precedente, sono riconducibili ai cuscinetti e a serramenti errati delle viti. Nel presente lavoro si considereranno tutti i possibili giochi concentrati nel riduttore armonico.



Figura 4.1: Usura della dentatura del Flex Spline.

### 4.1 Descrizione delle traiettorie

Come riportato nel *capitolo 1*, nel presente lavoro di tesi si cerca di ovviare alla carenza di dati storici su robot operanti in condizioni degradate sfruttando un modello numerico del manipolatore, implementato in ambiente MATLAB/Simulink. Tale approccio permette di generare un database contenente dati relativi a diversi gradi di usura e in diverse condizioni operative. Affinché i risultati ottenuti siano significativi dal punto di vista statistico, è necessario effettuare un numero sufficientemente elevato di simulazioni in condizioni differenti. In particolare, si sono considerate cinque diverse traiettorie per applicazioni di *pick-and-place*<sup>7</sup>. Gli andamenti temporali della posizione angolare assunta dai sei giunti, per ciascuna delle cinque traiettorie considerate, sono riportarti nell'appendice A. Tali traiettorie sono state ideate con lo scopo di rappresentare i movimenti solitamente eseguiti dai manipolatori antropomorfi durante questa tipologia di operazioni. Considerata la complessità del modello numerico e i tempi necessari per eseguire le simulazioni<sup>8</sup>, si è cercato un compromesso tra le durate delle traiettorie, riportate in tabella 4.1, e la loro capacità di essere rappresentative di reali applicazioni industriali. A tal fine, si sono scelte oculatamente le velocità dei sei giunti: maggiori in assenza del carico e minori in presenza di esso.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Di seguito esse verranno indicate con numeri da uno a cinque. Tale numero è indicativo soltanto dell'ordine con il quale sono state realizzate in laboratorio ed è stato introdotto esclusivamente per poterle identificare.

 $<sup>^{8}</sup>$ Con una velocità di *clock* della CPU pari a 3,6 GHz, sono necessari circa 20 minuti per simulare un secondo della traiettoria percorsa dal robot.

Inoltre, si sono introdotti due periodi, pari a un secondo ciascuno, in cui tutti i giunti sono fermi<sup>9</sup>, in modo da simulare l'operazione di presa (pick) e di rilascio (place) da parte del gripper.

Traiettoria #1:	5,6 s
Traiettoria $#2:$	$8{,}5~\mathrm{s}$
Traiettoria #3:	$8{,}5~{\rm s}$
Traiettoria $#4:$	$9{,}5~{\rm s}$
Traiettoria $#5$ :	6,6 s

Tabella 4.1: Durate traiettorie simulate.

Per ogni traiettoria sono state eseguite cento simulazioni considerando cinque livelli di gioco tra loro equidistanti  $(0^{\circ}, 0.025^{\circ}, 0.05^{\circ}, 0.075^{\circ} e 0.1^{\circ})$ , per ognuno dei quali si sono effettuate venti prove al variare della temperatura dell'ambiente esterno e della massa dell'oggetto movimentato. Tali grandezze sono state scelte in modo casuale, ma con una frequenza dettata da una distribuzione normale. Con l'obiettivo di generare delle temperature coerenti con quelle presenti in un impianto industriale, si è fatta variare tale grandezza nel range 15 - 30 °C, mentre per quanto riguarda la massa dell'oggetto spostato si è considerato un valore pari a 2 kq, ma soggetto ad una varianza di  $\pm 30 \ g$ . Questa scelta è stata condizionata dal *payload* del robot considerato come caso studio, pari a 5 kg. In genere, si tende ad acquistare macchine con capacità di carico maggiori di quelle strettamente necessarie per eseguire l'operazione a cui si interessati, sia per evitare sollecitazioni eccessive, preservandone l'integrità, sia a fronte di futuri reimpieghi. Inoltre, si è scelto di considerare una massa variabile al fine di analizzare come questa incide sull'analisi diagnostica e prognostica, in modo da poter tenere conto anche di quelle applicazioni in cui i corpi movimentati sono soggetti a leggere variazioni di tale grandezza. In figura 4.2 sono riportate le distribuzioni e le corrispondenti distribuzioni normali della temperatura dell'ambiente esterno e della massa dell'oggetto spostato utilizzate nelle simulazioni.

Al primo livello di gioco considerato corrisponde un riduttore non soggetto ad usura, operante in condizioni nominali, mentre l'ultimo livello è stato posto come valore limite che determina la non operabilità del componente. In letteratura non sono presenti studi che permettano di avere dei riferi-

 $<sup>{}^{9}</sup>$ Fa eccezione la traiettoria #5 in cui il terzo polso, durante la presa e il rilascio del pezzo, ruota simulando, rispettivamente, uno svitamento e un avvitamento.



Figura 4.2: Distribuzione e distribuzione normale della temperatura esterna e del *payload*.

menti per la scelta di tale valore massimo, pertanto, è stato determinato in funzione dei seguenti due fattori:

- l'errore sulla posizione nello spazio operativo del *Tool Center Point* derivante dalla presenza del gioco;
- il tipo di operazione eseguita dal robot.

Questi sono tra loro fortemente correlati, essendo entrambi legati alla precisione richiesta al robot. In riferimento al primo, si è scelto di considerare tale errore poiché si è interessati al percorso seguito dal TCP, essendo questa la parte del manipolatore che interagisce con l'ambiente circostante e con il pezzo, e non a quello dei singoli giunti. Per quanto riguarda il secondo punto, la mansione eseguita dalla macchina gioca un ruolo fondamentale essendovi applicazioni in cui sono richieste delle precisioni maggiori rispetto ad altre. Inoltre, anche per una stessa tipologia di *task* possono essere richieste precisioni aventi ordini di grandezza differenti. Si pensi, ad esempio, allo spostamento di scatole di cartone e di componenti elettronici. Entrambe sono operazioni di *pick-and-place*, ma mentre nel primo caso un errore di pochi millimetri potrebbe non influenzare l'operabilità, nel secondo questo comporta l'impossibilità di compiere la mansione assegnata.

Nel caso in esame si è scelto di simulare proprio delle operazioni di *pick-and-place*, sia perché ad oggi è quella più diffusa per questa tipologia di robot

[71], sia perché, essendo un'operazione in cui generalmente non è richiesta un'elevata precisione, si ha un margine maggiore per far progredire il guasto tra le condizioni di fabbrica e quelle giudicate tali da richiedere la sostituzione del giunto. In particolare, si è considerato lo spostamento di un cilindro di materiale ferroso avente raggio di base e altezza, rispettivamente, pari a 25 e 130 mm. Per tale applicazione si è ritenuto accettabile un errore sul posizionamento del TCP minore di un millimetro. Posto un limite massimo all'errore, si è utilizzato un approccio del tipo trial and error per determinare che, nel caso specifico, un backlash di 0,1° non è accettabile ai fini di una corretta esecuzione del compito assegnato al manipolatore. In altre tipologie di operazioni, quale, ad esempio, quella di saldatura, tale valore di soglia può essere eccessivo, dando luogo a prodotti non conformi alle specifiche e, quindi, da scartare. Questo evidenzia l'importanza di fissare delle soglie limite in funzione dell'applicazione considerata. Nel caso oggetto di studio, anche considerando il primo livello di gioco diverso da zero  $(0,025^{\circ})$ , vi sono delle parti della traiettoria in cui l'errore sul posizionamento del TCP è maggiore della ripetibilità, pari a 0,1 mm. Questo si accentua maggiormente se, anziché considerare il robot UR5 CB-series, si considera il più recente UR5 e-series, molto simile al precedente ma caratterizzato da una ripetibilità pari a 0,03 mm.

Per simulare la presa e il rilascio del carico è stato modificato il modello Simscape del manipolatore, descritto nel *paragrafo 3.5*, introducendo una massa variabile il cui valore è nullo quando il robot è scarico, mentre è pari alla massa scelta in maniera casuale dall'istante in cui viene sollevato il corpo fino a quello del rilascio. Tale variazione avviene tramite una rampa molto ripida, avendo considerato una fase transitoria pari a 0,05 s. Analizzando, ad esempio, la traiettoria #2, con riferimento alla *figura 4.3*, si è considerato che l'azione della forza peso agisca al termine del primo tratto in cui tutte e tre le coordinate spaziali del *Tool Center Point* sono costanti, ovvero quando l'oggetto viene alzato, mentre si è supposto che venga rilasciato all'inizio della seconda pausa, in quanto, ad eccezione dei casi in cui il pezzo viene lasciato cadere, appena esso viene depositato la sua forza peso non agisce più sul robot, ma sul piano d'appoggio.



Figura 4.3: Andamento temporale delle coordinate del TCP per la trai<br/>ettoria#2.

### 4.2 Analisi dei risultati delle simulazioni

Dalle simulazioni effettuate si osserva che, a causa della presenza del backlash tra i denti del riduttore, ogniqualvolta il segno della corrente di quadratura dell'azionamento elettrico subisce una variazione si determina un annullamento della coppia trasmessa per una durata tale da permettere il recupero del gioco (figura 4.4 e 4.5). In particolare, tale annullamento comporta l'insorgenza di un errore tra il segnale di riferimento della velocità angolare del giunto e il corrispondente segnale di feedback. Come spiegato nella sezione 3.1, essendo l'anello di corrente interno rispetto a quello di velocità, a fronte di un errore di quest'ultima, il controllore di corrente comanda un incremento (in valore assoluto) della tensione di alimentazione del motore elettrico in modo da compensarlo. Pertanto, come si può vedere dalla figura 4.5, al recupero del gioco nel riduttore è associato un picco nel segnale di corrente. Questi ultimi, come verrà spiegato dettagliatamente nel capitolo 5, verranno utilizzati come indicatori di salute.

In *figura 4.6* si riporta il confronto tra l'andamento della velocità angolare del giunto in condizioni nominali e in presenza del gioco massimo preso in esame. Da questa si può osservare che essi si discostano soltanto in corrispondenza degli istanti in cui si annulla la coppia trasmessa.



Figura 4.4: Andamento della coppia trasmessa al giunto di spalla in presenza di un backlash pari a  $0,1^{\circ}$  per la traiettoria #2.



Figura 4.5: Andamento della corrente di quadratura del giunto di spalla con *backlash* pari a  $0,1^{\circ} \in 0^{\circ}$  per la traiettoria #2.



Figura 4.6: Confronto tra l'andamento della velocità angolare del giunto di spalla con severity pari a 0% e 100% per la traiettoria #2.

Il cambio della polarità della corrente di quadratura si manifesta sia quando viene comandata un'inversione del moto del giunto, quindi in corrispondenza dell'inversione del senso di rotazione dell'albero motore, che quando cambia l'effetto dell'azione della forza di gravità sul giunto durante l'esecuzione della traiettoria. Per chiarire il secondo caso si consideri il seguente esempio. Si supponga che il manipolatore esegua una traiettoria in cui l'articolazione di spalla ruota di 90°, dalla configurazione mostrata in fiqura 4.7-a a quella in fiqura 4.7-b, con velocità angolare costante, mantenendo, per semplicità, gli altri giunti fermi. Durante la prima parte della traiettoria, l'azione della forza di gravità  $(F_q)$  determina una coppia  $(M_q)$  che si oppone a quella motrice erogata dal motore elettrico, ottenuta fornendo una corrente con una certa polarità. Al contrario, nella seconda parte della traiettoria, la forza di gravità determinerà una coppia che favorisce il moto, pertanto, per mantenere la velocità costante, al motore si dovrà fornire una corrente con polarità opposta alla precedente. In corrispondenza dell'istante in cui l'azione della gravità passa da resistente a motrice, in presenza di un backlash non nullo, si verifica un cambiamento dei denti in presa, durante il quale la coppia trasmessa si annulla.



Figura 4.7: Esempio della diversa azione della forza di gravità sul giunto di spalla.

In figura 4.8 è riportato l'errore del TCP dovuto alla presenza del gioco nel riduttore relativo alla traiettoria #2. Questo è stato calcolato determinando la distanza euclidea tridimensionale tra la posizione assunta in condizioni nominali e quella in condizioni degradate. Dal questa figura si può notare che, al crescere del *backlash* cresce pure l'errore e, che, in corrispondenza dei picchi di corrente evidenziati precedentemente, si registrano gli errori maggiori. Gli effetti riscontrati per le altre traiettorie eseguite, mostrati nell'appendice A, sono analoghi a quelli ottenuti per la traiettoria #2.



Figura 4.8: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #2 con *backlash* pari a 0,05° e 0,1°.

Nei robot a sei gradi di libertà, i primi tre giunti (base, spalla e gomito) permettono il posizionamento del TCP nello spazio di lavoro, mentre i restanti giunti (quelli di polso) consentono l'orientamento del *tool*. In analogia alla nomenclatura utilizzata in campo aeronautico, il suddetto orientamento viene definito tramite tre angoli: *roll, pitch* e *yaw*. Considerando il sistema di riferimento solidale alla base del robot, riportato in *figura 4.9*, si ha:

- *roll*: angolo ottenuto ruotando il terzo polso, permette di muovere il *tool* intorno all'asse *x*;
- *pitch*: angolo ottenuto dalla rotazione del primo polso, permette di muovere il *tool* intorno all'asse *y*;
- **yaw**: angolo ottenuto tramite la rotazione del secondo polso, permette di muovere il *tool* intorno all'asse z.



Figura 4.9: Sistema di riferimento solidale alla base del robot [11].

In modo analogo a quanto fatto per l'errore sul posizionamento del TCP, in *figura 4.10* si riportano gli errori dei suddetti angoli ottenuti in corrispondenza di un gioco pari a  $0,05^{\circ} e 0,1^{\circ}$  per la traiettoria #2. Considerata l'entità di tali errori, si può concludere che, per la traiettoria in esame, gli effetti del *backlash* nel giunto di spalla possono essere considerati trascurabili.



Figura 4.10: Errori degli angoli di *roll*, *pitch* e yaw per backlash pari a  $0,05^{\circ}$  e  $0,1^{\circ}$  per la traiettoria #2.

# Capitolo 5 Rilevazione del gioco

Al fine di ridurre i costi operativi e di supporto, il costo totale legato al possesso (TOC, *Total Ownership Cost*) e di aumentare la sicurezza di macchinari e sistemi complessi, quali, ad esempio, i robot industriali e collaborativi, è sorta la necessità di identificare e prevedere il manifestarsi di *fault* e *failure*, sia in componenti meccanici che elettronici. Mentre le operazioni di rilevazione (*detection*), identificazione (*identification*) e isolamento (*isolation*) dei guasti, ad oggi, hanno raggiunto elevati livelli di efficacia, la prognostica dello stato di salute del sistema rappresenta ancora una sfida aperta per ricercatori e progettisti [16].

Tali obiettivi possono essere raggiunti integrando la *Prognostic and Health Management* alla *Condition-Based Maintenance*. La prima, nota la fisica dei meccanismi di guasto, mira a predire il comportamento futuro del sistema, fornendo una stima del tempo di vita residuo sulla base dei segnali acquisiti. Tramite la seconda, invece, è possibile schedulare efficacemente gli interventi manutentivi, realizzandoli prima che il guasto comprometta l'operatività del sistema o la sicurezza del personale che opera nelle sue prossimità, ottimizzando allo stesso tempo l'impiego delle risorse effettuando gli interventi solo quando sono realmente necessari.

L'implementazione di un sistema di CBM/PHM richiede l'esecuzione di due fasi, una *offline* e una *online*. La prima, propedeutica alla seconda, comprende:

- la *feature selection*: consiste nella selezione degli indicatori più significativi in termini di correlazione con la tipologia di guasto considerata. Essa permette di massimizzare l'accuratezza delle operazioni di rilevamento e l'identificazione dell'avaria, riducendo i falsi allarmi;
- la FMECA: acronimo di *Failure Modes, Effects and Criticality Analy*sis, rappresenta una metodologia impiegata per classificare i rischi dei

guasti che possono manifestarsi all'interno del sistema. Essa prevede di assegnare ad ogni modalità di guasto un punteggio compreso tra 1 (poco critico) e 10 (molto critico), per i parametri: occurrence, severity e detectability. Moltiplicando tra loro tali punteggi si ottiene il Risk Priority Number (RPN), un indicatore della gravità della singola modalità di guasto. Confrontando l'indice ottenuto per le varie modalità di guasto è possibile valutare quale tra queste risultino maggiormente critiche;

• il **modello di degradazione**: permette di prevedere l'evoluzione del guasto e, pertanto, di stimare la RUL [16].

La fase online, come mostrato dallo schema in figura 5.1, prevede innanzitutto l'acquisizione dei dati dal sistema. In genere, questi, non potendo essere utilizzati nella loro forma qrezza, devono essere opportunamente elaborati al fine di facilitare le operazioni successive. Durante questa fase, detta preprocessamento, appositi algoritmi filtrano e comprimono i dati acquisti, in modo da incrementare il Signal-to-Noise Ratio (SNR) e ridurne le dimensioni, preservando il più possibile le informazioni relative al guasto. Terminata questa operazione, si estraggono dai segnali così ottenuti degli indicatori di salute, necessari per ottenere una relazione diretta tra le grandezze misurate dai sensori e le degradazioni che interessano il sistema. Successivamente, sulla base delle *feature* estratte, si procede con le operazioni di rilevamento, identificazione e isolamento. Queste permettono, rispettivamente, di riconoscere la presenza del guasto, determinandone l'entità, la posizione e la tipologia. Infine, noti i modelli di degradazione, è possibile fare delle previsioni sull'avanzamento dei difetti e, dunque, sulla vita utile residua, in funzione della quale si può schedulare l'intervento manutentivo.

Nel presente capitolo verrà descritto il processo di *feature selection* seguito per determinare gli indici di salute più idonei alla rilevazione dell'usura del riduttore armonico installato nei giunti del manipolatore, evidenziando le metriche adottate per la scelta di quello ottimale. I risultati ottenuti tramite quest'ultimo verranno confrontati con quelli provenienti dalla misurazione della differenza tra la posizione angolare dell'albero motore e quella del relativo giunto. Sebbene quest'ultima sembri la scelta più ovvia per la determinazione del gioco in questione, lo studio qui riportato è motivato dal fatto che alcuni robot, diversamente dall'UR5, non possiedono due encoder per ogni giunto, a monte e a valle del riduttore, e, pertanto, necessitano di una metodologia alternativa.





Figura 5.1: Schema della fase online di un sistema CBM/PHM.

### 5.1 Feature selection

Come anticipato precedentemente, l'elaborazione dei dati nei sistemi CBM/ PHM comprende due fasi. La prima, il preprocessamento, ha il compito di migliorare le caratteristiche dei segnali acquisiti dai sensori in modo da facilitare l'estrazione delle informazioni relative allo stato di salute del sistema. Durante questa fase i segnali grezzi vengono filtrati, amplificati, compressi, sottoposti a tecniche di *denoising* e validati. Quest'ultima operazione permette di verificare se i dati siano stati *corrotti* durante quelle precedenti e, inoltre, consente di accertare l'assenza di guasti nei sensori stessi. La seconda fase prevede la selezione e l'estrazione degli indicatori di salute dai dati così ottenuti, in modo da identificare i guasti incipienti. Questa rappresenta la pietra angolare di un sistema di diagnostica accurato ed efficace. Il processo di *feature selection*, dipendendo dall'applicazione considerata, si basa soprattutto sull'esperienza, sulle osservazioni e sulla comprensione di come il guasto influisce sul sistema. Al contrario, la *feature extraction* viene effettuata tramite un algoritmo che prende in input i dati provenienti dal sistema ed estrae gli indicatori di salute, nel modo computazionalmente più efficiente, alterandone il meno possibile il contenuto informativo [16].

In accordo con [72, 73], il processo appena descritto è inspirato al modello DIKW (*Data Information Knowledge Wisdom*), la cui rappresentazione piramidale è rappresentata in *figura 5.2*. Infatti, estraendo le *feature* dai segnali raccolti tramite i sensori, si sale di un gradino nella piramide, passando dai *Data* alle *Information*. Mettendo insieme queste ultime si arriva alla *Knowledge*, ovvero la conoscenza dello stato del sistema e, infine, sfruttando quanto ottenuto, si può raggiungere la *Wisdom*, che si traduce nella possibilità di prevedere l'evoluzione del guasto nel tempo.



Figura 5.2: Piramide DIKW.

Per poter definire un vettore di *feature* che permetta di rilevare ed identificare i guasti presi in esame, è necessario capire come i loro meccanismi influenzino i segnali acquisiti. Definito tale vettore, si selezionano le *feature* più adatte ai fini diagnostici e prognostici, ovvero quelle più rappresentative del guasto considerato [74]. Tale operazione permette di ridurre i tempi computazionali e di ovviare a quella che nella letteratura anglosassone viene definita *curse of dimensionality* (in italiano, *maledizione della dimensionalità*), introdotta per la prima volta in [75]. Secondo tale principio, la crescita del numero dei parametri all'interno di un *dataset* comporta un aumento esponenziale dei dati necessari affinché risultino statisticamente significativi. Il caso estremo è quello in cui si ha un numero di *feature* prossimo a quello delle osservazioni. Questo porta all'*overfitting* del modello, ottenendo ottimi risultati sul *dataset* utilizzato per l'addestramento, a fronte di risultati privi di significato per i dati utilizzati per testare il modello e provenienti dal sistema reale.

In [16], il vettore di feature  $\varphi[x(t)]$  viene definito come una statistica sufficiente rappresentativa dello stato completo e della storia x(t) del sistema, grazie al quale è possibile determinare le condizioni di fault e di failure z(t). Dato tale vettore, si può definire la funzione di densità di probabilità (o PDF, dall'inglese Probability Density Function) del guasto come:

$$f[z(t)|x(t)] = g[x(t)] \cdot h\{\varphi[(t), z(t)]\}$$
(5.1)

essendo g una funzione dipendente dallo stato completo del sistema ed h funzione del vettore di *feature* e della condizione di guasto.

Per realizzare l'operazione di *feature selection* è necessario dapprima confrontare i segnali ottenuti in assenza di guasto con quelli in cui quest'ultimo è presente, in modo da determinare quali sono le grandezze che subiscono variazioni. Come riportato nel capitolo 4, l'introduzione di un certo livello di gioco nel modello del riduttore produce le alterazioni più significative nei segnali di velocità e accelerazioni del giunto, di coppia e in quelli relativi alle grandezze elettriche del motore. Dopo aver analizzato questi segnali, le loro combinazioni e le combinazioni con i valori assunti dalla temperatura ambiente e dalla massa del *payload*, si è constatato che il segnale della corrente di quadratura e quello di coppia sono i più rappresentativi del guasto e della sua entità. Quest'ultimo, però, è stato scartato poiché calcolato a partire da quello di corrente, non essendo presenti sensori di coppia, mentre il segnale di corrente può essere estratto direttamente dal robot. A scopo esemplificativo, in figura 5.3 si è riportato il confronto tra l'andamento assunto dalla corrente di quadratura, per eseguire la traiettoria #2, con backlash pari a: 0°, 0,05°  $e 0,1^{\circ}$ . Da questa si nota una sovrapposizione dell'andamento generale per i diversi gradi di guasto, mentre i picchi che si manifestano poco dopo l'attraversamento del valore di zero risultano tanto maggiori quanto maggiore è il valore del gioco introdotto, mentre non sono presenti in assenza di esso.

Combinando e manipolando i segnali estratti dal modello, si sono cercate delle *feature* che permettessero di individuare la presenza del gioco indipendentemente dalla traiettoria effettuata dal manipolatore, in modo da generalizzare il processo di identificazione del guasto. Considerata la forte dipendenza tra le grandezze analizzate e le traiettorie descritte dal braccio
Rilevazione del gioco



Figura 5.3: Confronto dell'andamento della corrente di quadratura per tre diversi gradi di *severity* del guasto nel giunto di spalla per la traiettoria #2.

robotico, non si è riusciti a trovare una correlazione tra i valori assunti dalle feature e l'entità del guasto valida per tutte le traiettorie considerate, pertanto, si è proceduto considerando le traiettorie singolarmente. Nonostante questo, lo studio qui riportato mantiene la sua valenza in quanto, ad oggi, i robot industriali solitamente vengono utilizzati per eseguire la stessa mansione per periodi relativamente lunghi, sufficienti a determinare l'insorgenza di gioco nel riduttore [44]. A titolo di esempio, in base a quanto riportato in [71], il settore *automotive* si conferma ogni anno come quello con il maggior impiego di robot. In tale ambito, questi effettuano i medesimi movimenti per l'intera durata della linea nella quale sono inseriti, generalmente non inferiore a tre o quattro anni. Quanto appena riportato non varrebbe per i robot collaborativi, essendo progettati per avere elevata flessibilità di impiego e, di conseguenza, per produzioni che interessano archi temporali minori. A questo si contrappone il trend venutosi a delineare negli ultimi anni in cui molte aziende optano per robot collaborativi soltanto per i loro costi ridotti rispetto ai robot industriali, utilizzandoli come si farebbe con questi ultimi. In questo caso, le considerazioni fatte per i robot industriali possono essere estese anche per quelli collaborativi. Inoltre, come riportato nel capitolo 1, si vuole sottolineare che, a meno dei parametri utilizzati all'interno del modello, la presente trattazione si propone di avere un carattere generale e non applicabile soltanto al robot UR5 o ai robot collaborativi, bensì a tutti i robot antropomorfi.

#### 5.1.1 Individuazione delle *feature*

Come riportato nel paragrafo 4.2, la presenza del backlash nel giunto del robot comporta l'insorgenza di picchi nel segnale di corrente di quadratura  $(i_q)$ . Pertanto, per individuare il guasto sono necessarie delle feature che permettano di cogliere questo comportamento. Per fare ciò, in [76] vengono consigliati gli indicatori riportati in tabella 5.1, dove  $x_i$  indica l'elemento *i-esimo* del generico vettore x, che nel caso specifico è rappresentato dal vettore della corrente  $i_q$ , e con N la sua lunghezza.

Feature	Simbolo	Nome
$\max_{i} \left( x_i \right) - \min_{i} \left( x_i \right)$	$f'_1$	Peak-to-peak value
$\frac{\displaystyle \max_{i}  x_{i} }{\left(\frac{1}{N} \sum\limits_{i=1}^{N} \sqrt{ x_{i} }\right)^{2}}$	$f_2'$	Clearance factor
$\frac{\displaystyle\frac{\max_i  x_i }{\frac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^N  x_i }$	$f'_3$	Impulse factor
$\frac{\displaystyle\frac{\max_i x_i }{\sqrt{\frac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^N x_i^2}}$	$f'_4$	Crest factor

Tabella 5.1: *Feature* per l'individuazione dei picchi nel segnale di corrente.

Una prima analisi di tali indicatori può essere effettuata rappresentando i valori assunti, in funzione dei differenti livelli di gioco, in un grafico ad istogrammi. Considerando, per coerenza con quanto riportato precedentemente, la traiettoria #2, si osserva dalla figura 5.4, che per la feature indicata con  $f'_1$ si hanno cinque distribuzioni ben separate tra loro, mentre per le restanti tre gli istogrammi relativi alla baseline (severity 0%) e quelli relativi al primo livello di degrado (severity 25%) risultano sovrapposti. Questo è dovuto al fatto che, essendo  $f'_2$ ,  $f'_3$  ed  $f'_4$  direttamente proporzionali al massimo valore assoluto assunto dalla corrente  $i_q$  durante l'esecuzione della traiettoria, come mostrato nella figura 5.5, i picchi dovuti alla presenza del gioco risultano minori del valore assoluto della corrente all'istante t = 7, 5 s. Per ovviare a tale problema si possono modificare gli indicatori proposti in tabella 5.1 sostituendo il numeratore di  $f'_2$ ,  $f'_3$  ed  $f'_4$  con l'espressione della feature  $f'_1$ , come riportato in tabella 5.2. La rappresentazione grafica degli istogrammi ottenuti a seguito di tale modifica è riportata in figura 5.6.





Figura 5.4: Distribuzione dei valori delle *feature* in funzione della *severity* del guasto per la traiettoria #2.

Rilevazione del gioco



Figura 5.5: Confronto tra gli andamenti della corrente  $i_q$  con severity pari 0% e 25% per la traiettoria #2.

Feature	Simbolo
$\max_{i} \left( x_i \right) - \min_{i} \left( x_i \right)$	$f_1$
$\frac{\underset{i}{\max(x_i) - \underset{i}{\min(x_i)}}}{\left(\frac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^N \sqrt{ x_i }\right)^2}$	$f_2$
$\frac{\max\limits_i(x_i) - \min\limits_i(x_i)}{\frac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^N  x_i }$	$f_3$
$\frac{\displaystyle \max_i(x_i) - \min_i(x_i)}{\displaystyle \sqrt{\frac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^N x_i^2}}$	$f_4$

Tabella 5.2: *Feature* per l'individuazione dei picchi nel segnale di corrente modificate per evitare la sovrapposizione degli istogrammi.



Rilevazione del gioco

Figura 5.6: Distribuzione dei valori delle *feature* modificate al variare della *severity* del guasto per la traiettoria #2.

Gli indicatori riportati in *tabella 5.1* provengono da una prima selezione effettuata sulla base dei risultati ottenuti dai grafici ad istogrammi. Altre *feature*, spesso utilizzate nei sistemi di diagnostica e prognostica, sono state escluse dalla presente trattazione a causa delle loro *performance* visibilmente inferiori, avendo frequenze di accadimento ridotte e distribuzioni al variare delle *severity* tra loro sovrapposte. Tra queste si riportano:

• **shape factor**: permette di individuare le variazioni della forma del segnale in condizioni degradate rispetto a quella di *baseline*:

$$shape factor = \frac{rms(x)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i|}$$
(5.2)

• skewness: la presenza di *fault* può determinare un incremento dell'asimmetria nella distribuzione di una grandezza correlata al guasto. Quantificando tale variazione, l'indicatore permette la rilevazione di uno scostamento dalle condizioni nominali:

$$skewness = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2\right]^{3/2}}$$
(5.3)

• **kurtosis**: si basa sul fatto che in condizioni degradate le code della distribuzione, o, analogamente, il numero degli *outlier*, di un segna-le tendono a crescere. In una distribuzione normale tale parametro assume un valore pari a tre:

$$kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2\right]^2}$$
(5.4)

#### 5.1.2 Valutazione delle *feature*

Al fine di ridurre le dimensioni del vettore di *feature*  $\varphi[x(t)]$ , è buona norma verificare se al suo interno sono presenti indicatori ridondanti. Grazie alla divergenza di Kullback-Leibler (KL), anche detta *entropia relativa*, è possibile determinare in che misura due distribuzioni differiscono tra loro. Indicando con P(x) e Q(x) le distribuzioni di probabilità di due generiche grandezze statistiche, la divergenza di KL è definita come:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{x} P(x) \log \frac{P(x)}{Q(x)}$$
(5.5)

In particolare, per la diseguaglianza di Gibbs si ha:

$$D_{KL}(P||Q) \ge 0 \tag{5.6}$$

dove l'uguaglianza è soddisfatta se e solo se P = Q. Anche se spesso ci si riferisce a tale misura in termini di distanza tra le due distribuzioni, è bene sottolineare che, a rigore, l'entropia relativa non è definibile come tale essendo  $D_{KL}(P||Q) \neq D_{KL}(Q||P)$  [77].

Nel caso in esame, calcolando tale grandezza per tutti gli indicatori riportati in tabella 5.2, si è appurata l'assenza di feature ridondanti. Inoltre, determinando la distanza tra la condizione sana/nominale e quella degradata, per ogni livello di backlash, si ottiene un'indicazione della distinguibilità tra le classi: healthy e faulthy. In figura 5.7 si è riportato l'andamento della suddetta grandezza per le quattro feature considerate, prendendo in esame la traiettoria #2. Non avere curve sovrapposte è una conferma dell'assenza di feature ridondanti.



Figura 5.7: Andamento della divergenza di Kullback-Leibler delle *feature* analizzate per la traiettoria #2.

Al fine di determinare la correlazione tra gli indicatori di salute e i fattori interni (il guasto) ed esterni (la temperatura dell'ambiente e la massa del *payload*), è bene utilizzare un indice di dipendenza piuttosto che di distanza, quale l'entropia relativa.

Per quantificare la relazione di linearità tra due variabili statistiche X e Y, che, nel caso in esame, sono rappresentative delle *feature* e delle *severity* del guasto, è possibile utilizzare l'indice di correlazione di Pearson, definito come:

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{5.7}$$

Avendo indicato con  $\sigma_X$  e  $\sigma_Y$  la deviazione standard delle due variabili aleatorie e con Cov(X, Y) la covarianza, definita come il valore atteso  $\mathbb{E}$  del prodotto tra la distanza delle variabili X e Y e i rispettivi valori medi  $\mu_X$  e  $\mu_Y$ :

$$Cov(X,Y) = \mathbb{E}[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$$
(5.8)

Dalla diseguaglianza di Cauchy-Schwarz si ha:

$$\rho_{XY}^2 \le 1 \tag{5.9}$$

ovvero  $-1 \leq \rho_{XY} \leq 1$ . In particolare si ha che:

- $\rho_{XY} = 1$  indica una correlazione lineare positiva;
- $\rho_{XY} = -1$  indica una correlazione lineare negativa;
- $\rho_{XY} = 0$  indica che le due variabili non sono correlate.

Nella *tabella 5.3* si riportano i coefficienti calcolati per ognuna delle *feature* considerate e per le cinque traiettorie realizzate, indicate per brevità con *traj.* Da questa si può vedere come tutti gli indicatori considerati hanno un'elevata correlazione con il guasto e che, per una stessa traiettoria, si hanno valori molto vicini tra loro, indicativo del fatto che le quattro *feature* esaminate sono tra loro molto simili. Questo lo si può dedurre anche dal fatto che le curve riportate in *figura 5.7* sono relativamente vicine l'un l'altra.

	traj #1	traj #2	traj #3	traj #4	traj #5
$\mathbf{f_1}$	0,983	$0,\!995$	0,996	0,969	0,990
$f_2$	0,983	$0,\!995$	0,963	0,970	0,993
$f_3$	0,983	$0,\!995$	0,960	0,969	0,993
$f_4$	0,983	0,994	0,958	0,969	0,992

Rilevazione del gioco

Tabella 5.3: Coefficienti di correlazione di Pearson tra le *feature* e il guasto.

Con l'indice di correlazione di Pearson si è calcolata la dipendenza tra le *feature* e i fattori interni, per calcolare quella con i fattori esterni si fa ricorso al *signal-to-noise ratio*, definito come:

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{\mu_f^2}{\sigma_f^2}\right) \tag{5.10}$$

Nelle tabelle 5.4 e 5.5 si riportano i valori, espressi in dB, ottenuti in corrispondenza di severity pari al 25% e 100% per le cinque traiettorie, mentre in tabella 5.6 si hanno i valori medi relativi a tutti i livelli di degrado. Coerentemente con quanto visto precedentemente, anche questo parametro evidenzia che, per una stessa traiettoria, i valori ottenuti per le diverse feature sono molto prossimi tra loro.

	traj #1	traj #2	traj #3	traj #4	traj $\#5$
$\mathbf{f_1}$	27,060	39,116	38,990	42,248	38,522
$f_2$	27,181	39,719	39,433	41,912	38,844
$f_3$	27,299	39,729	39,480	41,939	38,662
$\mathbf{f}_4$	27,401	39,802	39,543	41,977	$38,\!596$

Tabella 5.4: *Signal-to-Noise Ratio*, espresso in dB, per una *severity* pari al 25% per ogni traiettoria.

	traj #1	traj #2	traj #3	traj #4	traj #5
$\mathbf{f_1}$	$27,\!484$	44,969	$31,\!258$	$46,\!151$	32,231
$f_2$	$27,\!193$	45,019	$31,\!258$	46,405	$35,\!603$
$f_3$	27,058	45,043	30,845	46,461	$35,\!037$
$\mathbf{f}_4$	26,923	45,112	30,484	46,458	35,603

Rilevazione del gioco

Tabella 5.5: *Signal-to-Noise Ratio*, espresso in dB, per una *severity* pari al 25% per ogni traiettoria.

	traj #1	traj #2	traj #3	traj #4	traj $\#5$
$\mathbf{f_1}$	$27,\!960$	41,748	33,887	43,262	36,311
$f_2$	28,080	42,210	$33,\!959$	$43,\!636$	$37,\!177$
$f_3$	28,134	42,331	33,947	43,714	37,037
$f_4$	28,198	42,392	33,912	43,781	36,971

Tabella 5.6: *Signal-to-Noise Ratio*, espresso in dB, medio di tutti i livelli di degrado per ogni traiettoria.

I sistemi di classificazione binaria possono restituire soltanto due risultati: 1/0, vero/falso o, nel caso in esame, sano/guasto. A seconda della correttezza della previsione si possono distinguere quattro casi:

- Classificato correttamente come guasto (vero positivo);
- Classificato erroneamente come guasto (falso positivo);
- Classificato correttamente come *sano* (vero negativo);
- Classificato erroneamente come sano (falso negativo).

Tali grandezze, riepilogate nella *matrice di decisione* riportata in *tabella* 5.7, permettono di determinare le *performance* degli algoritmi di diagnostica, generalmente espresse in termini di percentuale massima di falsi positivi e falsi negativi rilevati rispetto al numero di *fault* che un particolare componente riscontra durante il corso della sua vita. Mentre i falsi positivi inducono ad una manutenzione precoce e, quindi, ad un incremento dei costi, i falsi negativi sono potenzialmente più pericolosi in quanto possono portare ad un aggravarsi dei danni al sistema e/o pericolo per le persone, soprattutto

nell'ambito della robotica collaborativa. Per queste ragioni, solitamente, il
compromesso tra i due tende ad essere più stringente nei confronti dei falsi
negativi.

	$\begin{array}{c c} \mathbf{Guasto} \\ (F_1) \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathbf{Sano} \\ (F_0) \end{array}$	Totale
$\begin{array}{c} \textbf{Rilevato} \\ (D_1) \end{array}$	Veri positivi (a)	Falsi positivi (b)	Totale allarmi $(a+b)$
	Falsi negativi $(c)$	Veri negativi (d)	Totale non allarmi $(c+d)$
	Totale guasti $(a+c)$	Totale sani $(b+d)$	Totale casi (a+b+c+d)

Tabella 5.7: Matrice di decisione [16].

Di seguito si riportano alcune delle metriche utilizzate per la valutazione delle *feature* calcolabili tramite le grandezze definite in *tabella 5.7*:

• La **Probability Of Detection** (POD), anche detta True Positive Rate (TPR) o sensitività, indica la capacità di rilevare la presenza di avarie nei componenti guasti:

$$POD = \frac{a}{a+c} \tag{5.11}$$

• La **Probability Of False Alarm** (POFA), o False Positive Rate (FPR), rappresenta la probabilità di rilevare erroneamente la presenza di guasti:

$$POFA = \frac{b}{b+d} \tag{5.12}$$

• La **specificità**, nota anche come *True Negative Rate* (TNR), è la grandezza duale alla sensitività e rappresenta la capacità di rilevare l'assenza di guasti nei componenti sani:

$$Specificità = \frac{d}{b+d} \tag{5.13}$$

• L'accuratezza è indicativa della capacità di effettuare previsioni corrette sul totale di quelle realizzate:

$$Accuratezza = \frac{a+d}{a+b+c+d} \tag{5.14}$$

A seconda delle esigenze legate alla previsione, si prediligono indicatori aventi migliori *performance* in una metrica piuttosto che un'altra. Ad esempio, la POD assume maggiore rilievo quando è importante rilevare correttamente il maggior numero di gusti, anche a costo di classificare come tali componenti sani, al contrario, si predilige la specificità quando si vuole individuare correttamente il maggior numero di componenti sani, pur facendo rientrare in questa classe anche dei componenti guasti.

Un ulteriore metodo utilizzato per determinare la bontà degli indicatori selezionati è il *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Calcolando la probabilità che l'algoritmo restituisca un vero positivo e un falso positivo, al variare della soglia discriminante tra le classi *healthy* e *faulthy*, e riportando tali valori, rispettivamente, sugli assi delle ordinate e delle ascisse, si ottiene la *ROC curve* [78]. In particolare, l'area compresa tra la curva e l'asse delle ascisse, indicata in letteratura con l'acronimo AUC (*Area Under the Curve*), è rappresentativa dell'accuratezza della *feature* [79]. Si osserva che nel caso di una classificazione casuale si ottiene un AUC prossimo a 0,5, se il numero di campioni è sufficientemente grande, mentre si ha un valore unitario nel caso di un classificatore perfetto.

Come riportato in [80], le specifiche di progetto dei sistemi diagnostici e prognostici pongono un limite massimo al valore assunto dalla POFA, che, nel caso in esame, si è posto pari al 10%. Tale vincolo permette di calcolare i valori assunti dalle metriche sopra riportate, essendo queste dipendenti dalla soglia discriminante.

Come si è visto dalla *figura 5.6*, riferita alla traiettoria #2, le distribuzioni di probabilità per i cinque livelli di usura sono tra loro completamente separate per ognuna delle *feature* considerate. Questo si verifica per tutte le traiettorie analizzate ad eccezione della #3, nella quale si ha una parziale sovrapposizione in corrispondenza delle *severity* pari a 0% e 25%. Pertanto, per quattro traiettorie su cinque si ottengono POD, specificità e accuratezza pari al 100%, mentre si registrano *performance* inferiori nella restante. Per tale ragione, di seguito, ci si concentrerà maggiormente su quest'ultima traiettoria.

L'abilità di un sistema CBM/PHM di rilevare una *fault* e di predire una *failure*, solitamente, dipende dal livello di degradazione. Guasti incipienti o di lieve entità possono non essere individuati dall'algoritmo, portando ad una riduzione della vita utile del componente danneggiato e, di conseguenza, del tempo utile per effettuare l'opera di manutenzione prima che

l'avaria degeneri. A tal propositivo, una grandezza utile per la valutazione delle *feature* è la *severity* del guasto in corrispondenza di una POD pari al 95%, indicativa della capacità di rilevazione dell'anomalia. A differenza delle metriche precedenti, questa è tanto migliore quanto minore è il suo valore. Riportando su un grafico l'andamento della POD al variare dell'entità del guasto si ottiene la *success function*.

Considerando la traiettoria #3 e un livello di usura pari al 25%, nella *tabella 5.8* si riportano la POD, la specificità e l'accuratezza in corrispondenza di una POFA pari al 10%, nonché l'AUC e la *severity* in corrispondenza di una POD pari al 95% (indicata in tabella con  $Sev_{95}$ ).

	POD [%]	Specificità [%]	Accuratezza [%]	AUC[-]	$Sev_{95}$ [%]
$f_1$	85,75	89,79	88,03	0,943	41,22
$f_2$	80,89	89,87	86,40	0,838	43,47
$f_3$	84,07	90,00	87,52	0,937	42,17
$f_4$	90,68	89,80	90,19	0,945	$24,\!56$

Tabella 5.8: Metriche delle *feature* relative alla traiettoria #3, per un livello di usura pari al 25%.

Dalle tabelle 5.3 e 5.6 si può osservare che gli indici di correlazione di Pearson e il SNR ottenuti per i quattro indicatori considerati, a parità di traiettoria, sono tra loro molto simili. Al contrario, quest'ultima analisi permette di affermare che la feature  $f_4$  è da preferire alle altre avendo POD, accuratezza e AUC maggiori a fronte di una specificità paragonabile a quella posseduta dalle altre, nonché una miglior capacità di rilevazione. In riferimento all'indicatore selezionato si riportano nelle figure 5.8, 5.9, 5.10, rispettivamente, il grafico ad istogrammi della distribuzione assunta dalla feature, l'andamento della POD, della POFA, della specificità e dell'accuratezza al variare della soglia discriminante e la ROC curve affiancata alla success function. Rilevazione del gioco



Figura 5.8: Distribuzione assunta dalla *feature*  $f_4$  per *severity* pari a 0% e 25% per la traiettoria #3.



Figura 5.9: Andamento della POD, della POFA, della specificità e dell'accuratezza al variare della soglia discriminante per la *feature*  $f_4$  in riferimento alla traiettoria #3.



Figura 5.10: ROC *curve* (a sinistra) e success function (a destra) della feature  $f_4$ .

#### 5.2 Fault detection

Come riportato all'inizio del presente capitolo, l'attività di diagnosi si costituisce di tre operazioni [81]:

- fault detection: permette di rilevare la presenza delle anomalie nel sistema in esame;
- fault identification: ha il compito di determinare l'entità del guasto;
- fault isolation: permette l'individuazione del componente danneggiato.

Avendo considerato in questa trattazione un'unica modalità di guasto, il componente la cui avaria può essere rilevata è noto a priori e, pertanto, non verrà presa in esame l'operazione di *fault isolation*. Per quanto riguarda la fase di *fault detection*, dapprima si utilizzano i segnali relativi al sistema operante in condizioni nominali per estrarre le *feature* di interesse così da generare una o più distribuzioni di riferimento, o di *baseline*. Successivamente, queste vengono confrontate con le distribuzioni ottenute durante il funzionamento del robot al fine di verificarne eventuali scostamenti. In particolare, un'anomalia viene riscontrata quando il 95% della distribuzione della *feature* rappresentante lo stato di salute del sistema supera il 95° percentile di quella di *baseline*. In generale, tale rilevazione non è indicativa di uno stato di degrado tale da compromettere il corretto funzionamento del manipolatore, ma serve come input per l'operazione di prognostica, grazie alla quale è possibile stimare l'evoluzione del difetto e predire la vita residua del componente.

L'algoritmo utilizzato, oltre a permettere la determinazione dell'istante in cui la degradazione diviene individuabile, consente di monitorare la crescita del gioco tramite il parametro *fault ratio* che varia da zero, in corrispondenza della condizione nominale, a uno, quando il componente viene dichiarato guasto.

Per effettuare l'operazione di rilevamento della *fault* si sono realizzate delle simulazioni in cui, grazie al modello di degrado descritto nel paragrafo 3.4.2, il gioco progredisce in relazione alle condizioni di funzionamento che si manifestano durante l'esecuzione della traiettoria. In base a quanto riportato in [44], la vita operativa stimata per il riduttore in esame è di 35000 ore. Supponendo che questo sia il tempo necessario per passare da una condizione di gioco nullo a quella in cui quest'ultimo è pari a  $0.1 \text{ gradi}^{10}$ , si intuisce che non è possibile simulare l'effettivo funzionamento del manipolatore per un tale periodo di tempo, essendo necessari, con i tempi di calcolo riportati nel capitolo 4, quasi 5000 anni. Per ovviare a questo problema, si è adottato un coefficiente di usura che permettesse di passare dalle condizioni nominali a quelle di *failure* con numero limitato di simulazioni, che, nel caso in esame, è stato posto pari a 13. Successivamente, l'evoluzione del gioco e i valori assunti dalla *feature*  $f_4$  sono stati scalati in maniera da simulare il funzionamento per l'intera vita operativa dell'harmonic drive, ottenendo oltre 500.000 traiettorie. Essendo l'indicatore di salute dipendente dalla temperatura dell'ambiente e dal carico movimento, al suo andamento è stato aggiunto un rumore ottenuto calcolando la varianza dei valori assunti nella campagna di simulazioni in corrispondenza dei diversi valori di severity. In figura 5.11 sono riportate le suddette storie temporali. In particolare, l'andamento *pseudo-lineare* dell'evoluzione del gioco è coerente con quanto affermato dalla legge di Archard, anche se spesso, nella pratica, tale andamento è preceduto da una fase di rodaggio in cui il deterioramento del componente è trascurabile.

Prendendo in esame la traiettoria #2 e utilizzando la feature  $f_4$ , basata sull'acquisizione del segnale di corrente, come mostrato in figura 5.12, la rilevazione della presenza del gioco avviene quando il parametro Detection Flag passa da zero a uno, dopo 4352 ore di funzionamento. Il valore del gioco al rilevamento può essere determinato moltiplicando il parametro adimensionale Fault Ratio al gioco massimo ammissibile, ottenendo, nel caso

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Si ricorda che il valore del gioco limite pari a 0,1 gradi è stato scelto in relazione alla precisione richiesta per l'applicazione in esame.



Figura 5.11: Evoluzione del gioco e della *feature*  $f_4$  nel corso della vita operativa del riduttore armonico.

in esame, un valore di circa  $0,02^{\circ}$ . Inoltre, grazie all'indice *Confidence*, è possibile monitorare la probabilità di rilevamento durante il funzionamento del manipolatore.

Come anticipato all'inizio del presente capitolo, in presenza di un encoder a monte e uno a valle del riduttore, l'operazione di *fault detection* può essere effettuata sfruttando le misurazioni provenienti da tali sensori e, in particolare, tramite l'indicatore definito nel seguente modo:

$$f_5 = \max_i \left(\frac{qm_i}{\tau} - q_i\right) \tag{5.15}$$

avendo indicato con  $qm_i e q_i$ , rispettivamente, l'*i-esimo* valore dei vettori della velocità angolare del motore e del giunto e con  $\tau$  il rapporto di trasmissione del giunto. Come si osserva dalla *figura 5.13*, l'utilizzo di quest'ultima *feature* consente di anticipare la rilevazione della presenza del gioco avvenendo in corrispondenza di un valore pari a  $5 \cdot 10^{-4}$  gradi, dopo 71 ore di utilizzo. Questo risultato è anche dovuto al fatto che all'interno del modello i disturbi esterni legati all'aleatorietà della temperatura e del carico non incidono sulla misurazione delle due posizioni angolari. Essendo l'unica fonte di disturbo rappresentata dal rumore di misurazione, la relativa distribuzione è caratterizzata da una varianza limitata e, pertanto, anche uno scostamento contenuto determina il superamento del valore di soglia che determina la rilevazione della *fault*.



Figura 5.12: Risultati grafici ottenuti tramite l'algoritmo di *fault detection* utilizzando la *feature*  $f_4$ , con riferimento alla traiettoria #2.



Figura 5.13: Confronto tra i risultati grafici ottenuti tramite l'algoritmo di fault detection tra la feature  $f_4$  e la differenza della posizione angolare, con riferimento alla traiettoria #2.

Al fine di avvalorare i risultati ottenuti considerando la traiettoria #2, si è estesa l'analisi sopra riportata anche alla traiettoria #5. In particolare, la *feature*  $f_4$  ha permesso di rilevare il gioco quando assume un valore pari a circa 0,01°, dopo 3327 ore di funzionamento, mentre si registrano risultati migliori tramite  $f_5$  ottenendo un gioco all'istante del rilevamento pari a  $3 \cdot 10^{-4}$  gradi, dopo 46 ore di utilizzo.

In base a quanto riportato sopra, si può affermare  $f_4$  rappresenta un candidato promettente per essere impiegato come *feature* indicativa della presenza del gioco all'interno del riduttore installato nel giunto del robot. Tale asserzione è dovuta al fatto che, avendo esplorato un'unica modalità di guasto, non si può escludere che guasti di diversa natura determinino un comportamento sulla corrente di quadratura simile a quello registrato nel presente studio. Questo non vale per l'indice  $f_5$  essendo calcolato a partire da misurazioni dirette della posizione angolare dell'albero motore e del giunto. Se, tramite i futuri studi sulle modalità di guasto possibili nel giunto, venisse confermata la possibilità di impiegare la *feature*  $f_4$ , si otterrebbe che per rilevare la presenza di gioco nei giunti del manipolatore non è necessario disporre di un encoder a monte e uno a valle del riduttore. D'altro canto, tale configurazione, oltre a garantire migliori performance in termini di precisione di posizionamento e di controllo, consente un'individuazione più celere della presenza del gioco. Inoltre, l'impiego di due indicatori di salute basati sull'estrazione di segnali differenti conferisce una ridondanza al sistema di diagnostica e prognostica che permette di escludere segnalazioni dovute ad eventuali guasti nei sensori.

## Capitolo 6 Conclusioni e sviluppi futuri

Dopo aver evidenziato l'importanza dei sistemi di diagnostica e prognostica nel campo della robotica industriale e, in particolar modo, in quella collaborativa, si è constatato che, a causa della limitatezza dei dati storici relativi a robot operanti in condizioni non nominali, non è possibile allenare gli algoritmi *data-driven* di cui si necessita per l'implementazione di tale tecnologia.

Nel presente lavoro di tesi, si propone di risolvere tale problema sfruttando un approccio *model-based* così da creare un *dataset* che consenta l'allenamento dei suddetti algoritmi. A tal proposito, dopo aver analizzato i sottosistemi di cui si costituisce il manipolatore UR5, considerato come caso studio, si è implementato un modello *high-fidelity* di quest'ultimo, in modo da simularne il comportamento in condizioni nominali e non. In particolare, la trattazione verte sull'analisi degli effetti del gioco che si determina nei giunti a causa dell'usura del riduttore armonico. Tale fenomeno comporta errori nel posizionamento del *Tool Center Point* del manipolatore, compromettendo l'esito della mansione assegnata e, nel caso di robotica collaborativa, l'incolumità del personale operante nelle zone limitrofe.

In questa prima fase della ricerca, considerato l'elevato costo computazionale necessario per eseguire il modello *high-fedelity* del giunto, si è scelto di introdurlo soltanto in quello di spalla, utilizzando dei modelli semplificati nei restanti cinque. Infatti, tramite il *Simulink Profiler* si è constatato che l'esecuzione dello schema a blocchi più accurato necessita di un tempo di calcolo 2,5 volte maggiore. L'aver scelto di inserire il modello ad elevata fedeltà in un unico giunto comporta l'impossibilità di simulare gli effetti del gioco nelle restanti articolazioni. Sebbene in questa trattazione si sia considerata la presenza del gioco soltanto nel secondo giunto, il fine ultimo dello studio è di simularne gli effetti in ognuno di essi, sia individualmente che simultaneamente in più articolazioni. Sono diverse le ragioni per cui si è scelta la spalla come primo giunto da analizzare. In primo luogo, base, spalla e gomito sono i giunti più usati nelle applicazioni di *pick-and-place* e, quindi, più soggetti ad usura. Inoltre, da una valutazione sperimentale dei tempi e degli angoli di arresto in caso di emergenza, è emerso che la spalla è l'articolazione più critica.

Non essendo presenti in letteratura studi che permettano di avere dei riferimenti in merito all'entità del gioco nel riduttore che determina la non operabilità del robot, si è considerato un valore tale da generare un errore nel posizionamento del *Tool Center Point* inferiore a 1 mm, avendo scelto quest'ultimo come limite massimo accettabile per l'applicazione in esame. A differenza del posizionamento dell'utensile nello spazio di lavoro, per le traiettorie considerate, la presenza del gioco nel secondo giunto risulta trascurabile ai fini del corretto orientamento dello stesso.

Per ottenere dei risultati statisticamente significativi, utilizzabili ai fini diagnostici e prognostici, si sono realizzate cinquecento simulazioni nelle quali sono state prese in esame cinque diverse traiettorie per operazioni di *pick-and-place*, al variare della temperatura dell'ambiente esterno e del *payload* e considerando cinque livelli equidistanti di gioco, compresi tra 0° e  $0,1^{\circ}$ . Da tali simulazioni si è riscontrato che, in presenza di un gioco non nullo, ogniqualvolta il segno della corrente di quadratura dell'azionamento elettrico del secondo giunto subisce una variazione, si determina un annullamento della coppia trasmessa per una durata tale da permettere il recupero del gioco e, inoltre, si manifesta un picco nel segnale della suddetta corrente. Essendo l'ampiezza di quest'ultimo correlabile all'entità del backlash nel riduttore, si sono valutati degli indicatori di salute che permettessero di cogliere tale comportamento. Dopo aver determinato la correlazione tra le feature candidate e i fattori interni (il guasto) ed esterni (la temperatura dell'ambiente e il carico), nonché opportune metriche, quali la probability of detection, la specificità e l'accuratezza, si è scelto l'indicatore definito dalla seguente espressione:

$$f_4 = \frac{\max_k (i_{q,k}) - \min_k (i_{q,k})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{q,k}}}$$
(6.1)

avendo indicato con  $i_q$  il vettore della corrente di quadratura e con N la sua lunghezza. A questo se n'è affiancato un ulteriore ottenuto estraendo i segnali di posizione a monte e a valle del riduttore, definito come segue:

$$f_5 = \max_k \left(\frac{qm_k}{\tau} - q_k\right) \tag{6.2}$$

essendo  $qm \in q$ , rispettivamente, i vettori delle posizioni angolari dell'albero motore e del giunto, mentre  $\tau$  indica il rapporto di trasmissione del riduttore. Determinate le distribuzioni dei suddetti parametri in condizioni non degradate, per rilevare la presenza del gioco, si sono confrontate queste ultime con quelle ottenute durante il funzionamento della macchina.

Dagli studi effettuati, si può affermare che, nonostante  $f_5$  permetta rilevazioni più celeri rispetto ad  $f_4$ , quest'ultimo rappresenta un candidato promettente per essere utilizzato come indicatore di salute del riduttore. Avendo esplorato un'unica modalità di guasto, non si può escludere che *fault* di diversa natura portino ad un comportamento della corrente di quadratura simile a quello registrato nel presente studio. Pertanto, lo step successivo dello studio qui riportato sarà quello di analizzare altre modalità di guasto del giunto, così da poter confermare, o meno, la validità del parametro  $f_4$  ai fini dell'individuazione della presenza del gioco. Il suo utilizzo permetterebbe di rilevare l'usura tra le dentature in presa senza la necessità di disporre di un encoder a monte e uno a valle del riduttore.

Un ulteriore sviluppo futuro della presente ricerca è rappresentato dell'implementazione di un algoritmo di *particle filtering* che, dall'estrazione delle *feature* selezionate, a partire dall'instante in cui avviene la rilevazione della *fault*, consenta di stimare l'evoluzione del difetto e, quindi, della vita residua del riduttore. Questo permetterebbe di aumentare l'efficacia della gestione della manutenzione, contenendo i costi, e di salvaguardare la sicurezza del personale operante all'interno dell'area di lavoro del robot.

# Appendice A Traiettorie di pick-and-place

Di seguito, per ognuna delle cinque traiettorie considerate, si riportano:

- delle foto del braccio robotico in corrispondenza dei *waypoint* interessati che permettono di comprendere le traiettorie seguite;
- gli andamenti temporali delle posizioni angolari assunte dai sei giunti;
- gli errori sul posizionamento del TCP nello spazio operativo dovuti alla presenza del *backlash*  $(0,05^{\circ} e 0,1^{\circ})$ .

### Traiettoria #1



Figura A.1: Waypoint interessati nella traiettoria #1.



Figura A.2: Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria #1



Figura A.3: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #1 conbacklash pari a  $0,05^\circ$  e  $0,1^\circ.$ 

#### Traiettoria#2









(d)





(f)



Figura A.4: Waypoint interessati nella traiettoria #2.



Figura A.5: Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria #2



Figura A.6: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #2 con backlash pari a  $0,05^\circ$  e  $0,1^\circ.$ 

#### Traiettoria#3









(d)







Figura A.7: Waypoint interessati nella traiettoria #3.



Figura A.8: Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria#3



Figura A.9: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #3 conbacklash pari a  $0,05^\circ$  e  $0,1^\circ.$ 

### Traiettoria #4









(d)



(f)



Figura A.10: Waypoint interessati nella traiettoria #4.



Figura A.11: Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria #4



Figura A.12: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #4 con backlash pari a 0,05° e 0,1°.

### Traiettoria #5



Figura A.13: Waypoint interessati nella traiettoria #5.



Figura A.14: Posizione angolare dei sei giunti assunta nella traiettoria #5



Figura A.15: Errore sul posizionamento del TCP per la traiettoria #5 con backlash pari a  $0.05^{\circ}$  e  $0.1^{\circ}$ .

## Bibliografia

- [1] "Bathtub curve." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/ Bathtub\_curve
- [2] "Universal robots connecting an emergency stop device vs. a safeguard protective device." [Online]. Available: https: //www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/ connecting-an-emergency-stop-device-vs-a-safeguard-protective-device/
- [3] "Industrial robots what is a singularity?" [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/articles/ur/ application-installation/what-is-a-singularity/
- [4] Mathworks, "Clarke transform." [Online]. Available: https://it. mathworks.com/help/physmod/sps/ref/clarketransform.html
- [5] —, "Park transform." [Online]. Available: https://it.mathworks. com/help/mcb/ref/parktransform.html
- [6] K. N. D. Ranaweera et al., "Development and experimental testing of a speed controlled pmsm drive using psim visual programming environment," Development and Experimental Testing of a Speed Controlled PMSM Drive Using PSIM Visual Programming Environment, 2019.
- [7] Kollmorgen, "Kollmorgen robotics." [Online]. Available: https: //www.kollmorgen.com/it-it/solutions/robotics/robotica/
- [8] R. PACI, "Definizione e progettazione di massima di rotismi epicicloidali beveloid per applicazioni robotiche," 2014.
- [9] S. Liu and G. S. Chen, *Dynamics and control of robotic manipulators* with contact and friction. John Wiley & Sons, 2019.
- [10] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: modelling*, planning and control. Springer Science & Business Media, 2010.

- [11] "Universal robots programming feature point orientation." [Online]. Available: https://blog.hirebotics.com/engineering/ universal-robots-programming-feature-point-orientation
- [12] "Robot collaborativi." [Online]. Available: https://www. universal-robots.com/it/prodotti/
- [13] U. Robot, "Technical specifications," 2019.
- [14] U. Robots, "Max. joint torque." [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/articles/ur/ robot-care-maintenance/max-joint-torques/
- [15] R. Guida, "Sviluppo di un modello high-fidelity del robot ur5 ai fini diagnostici e prognostici," Master's thesis, Politecnico di Torino, 2020.
- [16] G. J. Vachtsevanos and G. J. Vachtsevanos, Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems. Wiley Hoboken, 2006, vol. 456.
- [17] "Industrial Robots." [Online]. Available: https://ifr.org/ industrial-robots
- [18] K. Schwab, La quarta rivoluzione industriale. FrancoAngeli, 2016.
- [19] U. Robots, "Cosa sono i robot collaborativi?" [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/it/ quali-sono-le-differenze-tra-cobot-e-robot-tradizionali/
- [20] A. K. Jardine and A. H. Tsang, *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications.* CRC press, 2013.
- [21] M. Tucci and G. Bettini, "Methods and tools for the reliability engineering: a plant maintenance perspective," *Proceedings of the 2nd maintenance management MM2006, Sorrento, Italy, April, 2006.*
- [22] J. Lee, "Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, no. 8, pp. 901–910, 1998.
- [23] J. Lee and J. Ni, "Infotronics-based intelligent maintenance system and its impacts to closed-loop product life cycle systems," in *Proc. Int. Conf.* on Intelligent Maintenance Systems, Arles, France, 2004, pp. 15–17.
- [24] B. Iung, "From remote maintenance to mas-based e-maintenance of an industrial process," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 14, no. 1, pp. 59–82, 2003.

- [25] L. Furlanetto, M. Garetti, and M. Macchi, Ingegneria della manutenzione, 2007.
- [26] A. Raviola, A. De Martin, R. Guida, G. Jacazio, S. Mauro, and M. Sorli, "Harmonic drive gear failures in industrial robots applications: An overview," in *PHM Society European Conference*, vol. 6, no. 1, 2021, pp. 11–11.
- [27] F. Camci, K. Medjaher, N. Zerhouni, and P. Nectoux, "Feature evaluation for effective bearing prognostics," *Quality and reliability engineering international*, vol. 29, no. 4, pp. 477–486, 2013.
- [28] Y. Li, S. Billington, C. Zhang, T. Kurfess, S. Danyluk, and S. Liang, "Adaptive prognostics for rolling element bearing condition," *Me-chanical systems and signal processing*, vol. 13, no. 1, pp. 103–113, 1999.
- [29] P. Costagliola, "Implementazione di un sistema di manutenzione preventiva per la determinazione dell'indece MTTR ottimo per una linea di produzione critica: caso studio presso lo stabilimento Prysmian di Arco Felice," Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Napoli Federco II, 2014.
- [30] L. Fedele, L. Furlanetto, and D. Saccardi, *Progettare e gestire la manutenzione*. McGraw-Hill Milano, 2004.
- [31] "Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio," Ente Nazionazionale Italiano di Unificazione, Standard UNI9910: 1991.
- [32] A. Davies, Management guide to condition monitoring in manufacture. Institution of Production Engineers London, UK, 1990.
- [33] A. Starr, R. Wynne, and I. Kennedy, "Failure analysis of mature robots in automated production," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 213, no. 8, pp. 813–824, 1999.
- [34] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, "Prognostics and health management design for rotary machinery systems—reviews, methodology and applications," *Mechanical systems* and signal processing, vol. 42, no. 1-2, pp. 314–334, 2014.
- [35] Q. Yang, X. Li, H. Cai, Y.-M. Hsu, J. Lee, C. H. Yang, Z. L. Li, and M. Y. Lin, "Fault prognosis of industrial robots in dynamic working
regimes: Find degradation in variations," *Measurement*, vol. 173, p. 108545, 2021.

- [36] K. Martin, "A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools," *International Journal of Machine Tools* and Manufacture, vol. 34, no. 4, pp. 527–551, 1994.
- [37] S. Das, R. Hall, S. Herzog, G. Harrison, M. Bodkin, and L. Martin, "Essential steps in prognostic health management," in 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. IEEE, 2011, pp. 1–9.
- [38] G. Zhang, "Optimum sensor localization/selection in a diagnostic/prognostic architecture," Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, 2005.
- [39] F. Turco, Principi generali di progettazione degli impianti industriali. CittàStudi, 1996.
- [40] "Informazioni su universal robots." [Online]. Available: https: //www.universal-robots.com/it/info-su-universal-robots/
- [41] U. Robot, "Cobots guide," 2015.
- [42] E. Atzeni, Sistemi integrati di produzione. I robot industriali, 2019.
- [43] "Kollmorgen aziona gli assistenti leggeri di universal robots." [Online]. Available: https://www.kollmorgen. com/it-it/service-and-support/knowledge-center/success-stories/ kollmorgen-aziona-gli-assistenti-leggeri-di-universal-robots/
- [44] H. D. AG, "Riduttore armonico harmonic drive." [Online]. Available: https://harmonicdrive.de/it/glossario/ riduttore-armonico-harmonic-drive
- [45] T. D. Tuttle, "Understanding and modeling the behavior of a harmonic drive gear transmission," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [46] Renishaw, "Aksim supports universal robots for smart factory automation." [Online]. Available: https://www.renishaw.com/en/ aksim-supports-universal-robots-for-smart-factory-automation--40389

- [47] U. Robots, "What is cb stop performance categories?" [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/articles/ur/safety/ what-is-cb3-stop-performance-categories/
- [48] R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 3, pp. 716–727, 1929.
- [49] D. C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, 1978.
- [50] S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen, and K. Stockman, "A quantitative comparison between bldc, pmsm, brushed dc and stepping motor technologies," in 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Ieee, 2016, pp. 1–5.
- [51] M. Marufuzzaman, M. B. I. Reaz, L. F. Rahman, and T. G. Chang, "High-speed current dq pi controller for vector controlled pmsm drive," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014.
- [52] Kollmorgen, "Tbm framless motor. selection guide."
- [53] K. Ueura and R. Slatter, "Development of the harmonic drive gear for space applications," *European Space Agency-Publications-ESA SP*, vol. 438, pp. 259–264, 1999.
- [54] L. C. Akoto and H. Spangenberg, "Modeling of backlash in drivetrains," 2013.
- [55] M. Nordin, J. Galic', and P.-O. Gutman, "New models for backlash and gear play," *International journal of adaptive control and signal* processing, 1997.
- [56] G. Tao and F. L. Lewis, *Adaptive control of nonsmooth dynamic systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [57] A. Brandt, Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures. John Wiley & Sons, 2011.
- [58] J. Swevers, C. Ganseman, D. B. Tukel, J. De Schutter, and H. Van Brussel, "Optimal robot excitation and identification," *IEEE transactions* on robotics and automation, vol. 13, no. 5, pp. 730–740, 1997.
- [59] A. Raviola, R. Guida, A. De Martin, S. Pastorelli, S. Mauro, and M. Sorli, "Effects of temperature and mounting configuration on the dynamic parameters identification of industrial robots," *Robotics*, vol. 10, no. 3, p. 83, 2021.

- [60] J. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," Journal of applied physics, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953.
- [61] J. A. Brandão, P. Cerqueira, J. H. Seabra, and M. J. Castro, "Measurement of mean wear coefficient during gear tests under various operating conditions," *Tribology International*, vol. 102, pp. 61–69, 2016.
- [62] J. Ma, C. Li, Y. Luo, and L. Cui, "Simulation of meshing characteristics of harmonic reducer and experimental verification," Advances in Mechanical Engineering, vol. 10, no. 3, p. 1687814018767494, 2018.
- [63] MathWorks, "Simscape multibody." [Online]. Available: https: //it.mathworks.com/products/simmechanics.html
- [64] P. Corke, Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB® second, completely revised. Springer, 2017.
- [65] U. Robots, "Dh for calculations of kiparameters dynamics." [Online]. Available: https: nematics and //www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/ dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics/
- [66] V. Viktorov and F. Colombo, Automazione dei sistemi meccanici. CLUT, 2011.
- [67] M. Sorli and G. Quaglia, *Meccatronica*. Politeko, 2003.
- [68] R. Hornung, H. Urbanek, J. Klodmann, C. Osendorfer, and P. Van Der Smagt, "Model-free robot anomaly detection," in 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014, pp. 3676–3683.
- [69] R. Isermann, Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems. Springer Science & Business Media, 2011.
- [70] B. Rinner, "Detecting and diagnosing faults," *Telematik*, vol. 8, no. 2, pp. 6–8, 2002.
- [71] I. F. of Robotics, "World robotics. industrial robots," Tech. Rep., 2020.
- [72] R. L. Ackoff, "From data to wisdom," Journal of applied systems analysis, vol. 16, no. 1, pp. 3–9, 1989.

- [73] S. Sathananthan, "Data valuation considering knowledge transformation, process models and data models," in 2018 12th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS). IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [74] S. Adams, R. Meekins, P. A. Beling, K. Farinholt, N. Brown, S. Polter, and Q. Dong, "A comparison of feature selection and feature extraction techniques for condition monitoring of a hydraulic actuator," in *Annual Conference of the PHM Society*, vol. 9, no. 1, 2017.
- [75] R. E. Bellman and S. E. Dreyfus, *Applied dynamic programming*. Princeton university press, 2015.
- [76] Mathworks, "Signal features." [Online]. Available: https://it. mathworks.com/help/predmaint/ug/signal-features.html
- [77] D. J. MacKay and D. J. Mac Kay, Information theory, inference and learning algorithms. Cambridge university press, 2003.
- [78] T. Fawcett, "An introduction to roc analysis," Pattern recognition letters, vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006.
- [79] A. P. Bradley, "The use of the area under the roc curve in the evaluation of machine learning algorithms," *Pattern recognition*, vol. 30, no. 7, pp. 1145–1159, 1997.
- [80] N. Andrea, "Modello completo di sistema di comandi di volo per elicotteri e relativa analisi su fault detection," Master's thesis, Politecnico di Torino, 2020.
- [81] J. J. Gertler, Fault detection and diagnosis in engineering systems. CRC press, 2017.