



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Sviluppo di una legge di controllo per free drive attivo di un robot collaborativo utilizzato per attività di riabilitazione neuromuscolare

Development of a control law for active free drive of a collaborative robot used for neuromuscular rehabilitation activities

Relatore:

Ing. Giacomo Palmieri

Studente:

Alessandro Cimini

Correlatore:

Ing. Giorgia Chiriatti

A.A. 2021/2022

Indice

1	Introduzione.....	5
1.1	Robot industriali e collaborativi.....	5
1.2	Cobot in ambito medico.....	7
1.3	Scopo del lavoro svolto	7
2	Metodo.....	8
2.1	Lavoro svolto.....	8
2.2	Piano di lavoro.....	8
2.2.1	Cobot UR5.....	10
2.3	Definizione delle leggi.....	12
2.3.1	Legge a tratti.....	12
2.3.2	Gain <i>smooth</i>	18
2.4	Simulink.....	21
3	Risultati.....	23
3.1	Software per le acquisizioni.....	23
3.2	Analisi dei dati.....	24
3.2.1	Dinamica e cinematica.....	25
3.2.2	Analisi senza ingresso.....	30
3.2.3	Confronto con Simulink.....	31
3.2.4	Tabella riassuntiva.....	33
4	Conclusione.....	34
	Bibliografia.....	35

1 INTRODUZIONE

1.1 Robot industriali e Robot collaborativi

Attualmente i sistemi robotici trovano diverse applicazioni, fra cui incarichi molto ripetitivi eseguiti anche in condizioni non appropriate per l'uomo. Per rendere possibili tali utilizzi, sono state progettate diverse tipologie di robot, con svariate configurazioni atte a soddisfare le richieste provenienti da plurimi settori dell'industria. Tra questi è possibile individuare robot industriali e collaborativi.

Un robot industriale è una struttura composta da parti elettroniche, elettriche e meccaniche, la cui diversa complessità consente alla macchina di poter eseguire una serie di azioni sempre più articolate. I robot industriali sono formati da corpi grandi e pesanti e vengono impiegati maggiormente per mansioni che risultano pericolose o molto difficoltose per l'essere umano. Al fine di poter compiere questi lavori, tali strutture sono oggi realizzate con almeno sei giunti rotanti, così da fornire flessibilità e la capacità di raggiungere qualsiasi punto interno allo spazio di lavoro in più di una configurazione. Generalmente applicati per compiti molto specifici, operano in uno spazio di lavoro separato dall'uomo e necessitano dunque di misure di sicurezza rigide (gabbie ad esempio), per prevenire la salute degli operatori [1,2,3,4]. Un esempio di robot industriale è illustrato in figura 1.



Fig. 1: rappresentazione di un robot industriale

I robot collaborativi (abbreviato: Cobot), invece, sono stati sviluppati con la possibilità di agire nella stessa area di lavoro di un operatore, così da sfruttare sia la forza, la resistenza e la precisione della macchina, che la flessibilità decisionale dell'uomo. Presentano, difatti, dimensioni nettamente minori rispetto alla loro controparte industriale, il che permette una certa versatilità nel posizionamento, oltre a sviluppare forze inferiori [1]. Per garantire una collaborazione uomo-macchina sicura e per favorire questa cooperazione, i cobot sono dotati di diversi meccanismi di sicurezza [3].

Rispetto ai robot industriali, inoltre, sono caratterizzati da una spiccata facilità di programmazione, da un peso nettamente inferiore, così da poter essere agevolmente spostati all'interno dell'ambiente lavorativo, e da una grande flessibilità nelle operazioni che sono in grado di eseguire [2,4]. In figura 2 sono rappresentati esempi di applicazioni di cobot in cui lavorano a fianco ad operatori umani.



Fig. 2: diversi esempi di collaborazione uomo-cobot [2]

1.2 Cobot in medicina

Oltre agli impieghi industriali, i cobot trovano collocazione anche in ambito medico.

In fase diagnostica, ad esempio, vengono usati dispositivi miniaturizzati, dotati di sensori, per applicazioni endoscopiche, in particolare per effettuare indagini preliminari poco invasive.

In ambito chirurgico, affiancano il clinico durante interventi particolarmente complessi, in quanto tali dispositivi sono in grado di garantire una precisione ed un'accuratezza non raggiungibile dal chirurgo; è, comunque, sempre necessaria la supervisione di uno specialista, dato che non è tuttora sicuro lasciarli lavorare in autonomia [6].

Un altro tipo di impiego riguarda il campo della riabilitazione, ove i cobot sono applicati principalmente per la riabilitazione neuromuscolare, ad esempio per l'arto superiore come si vedrà nel corso di questo elaborato. I cobot rappresentano un grande vantaggio nell'ambito della riabilitazione, in quanto, una volta collegato al polso del paziente, è possibile programmare il robot affinché fornisca una guida nel percorrere una traiettoria, correggendola nel caso fosse mal eseguita. La possibilità di poter programmare questi movimenti e di poterli rendere ripetitivi, ha fatto in modo che i cobot diventassero particolarmente popolari in questo genere di applicazioni.

1.3 Scopo

Lo scopo della tesi è sviluppare, sotto opportune specifiche, due leggi di controllo da implementare successivamente nel robot collaborativo usato. L'ultimo giunto del cobot verrà difatti collegato all'avambraccio di un paziente, con il fine di aiutarlo nell'esecuzione di esercizi riabilitativi per l'arto superiore.

Queste leggi di controllo sono funzioni ad una variabile, che descrivono l'andamento della coppia erogata dall'ultimo giunto del robot (variabile dipendente, nominata C_r) in funzione della coppia esercitata dall'uomo sul robot stesso (variabile indipendente, C_h). L'idea è di fornire un ausilio al paziente, in termini di coppia, il quale sarà dipendente dal movimento che andrà eseguito; brusche variazioni nell'output della macchina vanno chiaramente evitate, in quanto potrebbero provocare lesioni al soggetto in riabilitazione. Le funzioni avranno, in definitiva, un profilo smussato, così da non presentare punti angolosi.

Le leggi sono state, successivamente, testate su un software per simulazioni, prima, e direttamente sul robot, poi, per verificarne l'efficacia e il funzionamento.

2 METODO

2.1 Lavoro svolto

Il compito relativo all'attività di tirocinio è riassumibile principalmente in due parti: la prima, svolta interamente al computer, è volta alla definizione delle leggi di controllo e alla loro implementazione in un programma per simulazioni; la seconda, svolta in laboratorio, ha previsto la scrittura delle leggi sul software del cobot adoperato per l'attività di riabilitazione, per poi verificarne, tramite prove empiriche e acquisizioni di dati, l'efficacia.

Per la prima parte del lavoro è stato impiegato il software "Matlab", per definire il profilo desiderato delle funzioni e le relative leggi analitiche. Successivamente si è usufruito di "Simulink" (estensione di "Matlab" usata per effettuare simulazioni di sistemi reali) per studiare un soddisfacente modello del sistema meccanico rappresentante l'ultimo giunto del cobot, il cui comportamento è stato definito dalle leggi sviluppate nella parte precedente. Ponendo in ingresso segnali che imitassero il comportamento di un paziente generico, è stato possibile farsi un'idea riguardo la stabilità del sistema e l'aiuto fornito dalla macchina.

2.2 Strumentazione

Come evidenziato in figura 3,4 e 5 la postazione dove sono state effettuate le prove è composta da:

- Tavolo: delimita lo spazio di lavoro
- Teach Pendant (in rosso): tablet fornito assieme al robot, caratterizzato da un template grafico (programma in cui sono presenti spazi bianchi da riempire, in questo caso, con linee di codice) con cui l'operatore si interfaccia per la programmazione della macchina
- Cobot UR5: il robot
- Target point (in verde): usato durante l'attività di riabilitazione come target
- Smart camera (in blu): con visuale dall'alto, usata per riprendere la traiettoria del braccio del paziente durante un esercizio riabilitativo.
- Controller (rappresentato in fig. 3): collega il teach pendant al cobot, in modo da far eseguire i programmi a quest'ultimo, mette inoltre a disposizione prese per il collegamento cavi, ad esempio la presa ethernet usata per l'acquisizione dei dati.

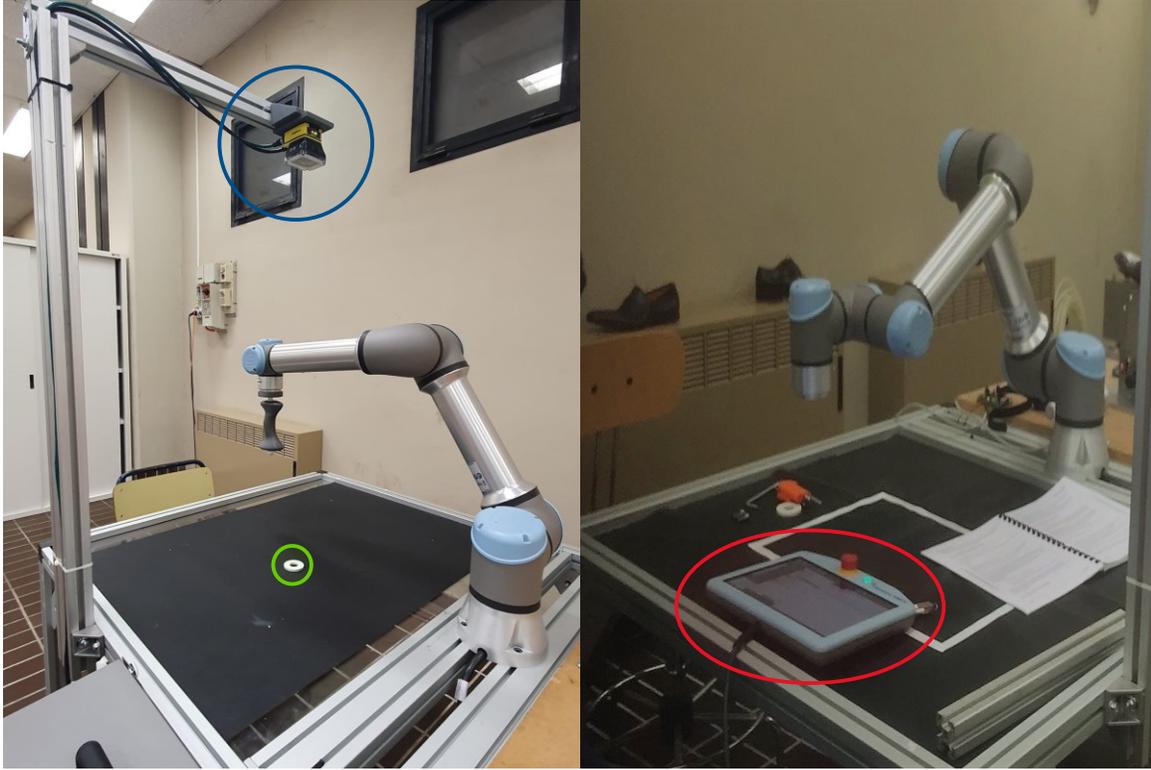


Fig. 3 e 4: piano di lavoro



Fig. 5: Controller

2.2.1 Cobot UR5

Il modello di cobot UR5, sviluppato dalla “Universal Robots”, è un braccio robot a 6 assi, il cui schema cinematico è indicato in fig. 6.

Il braccio è formato da tubi e giunti in plastica PP e alluminio; il totale è di 6 corpi più la base (supporto su cui il robot è montato) collegati fra loro tramite coppie rotoidali (che concedono cioè un grado di libertà rotazionale attorno l’asse congiungente i 2 corpi), per un peso di 18.4 kg; è possibile allora calcolare il numero di gradi di libertà del meccanismo attraverso la formula di Kutzbach :

$$(2.1) \quad n = 6(m - 1) - 5c_1 - 4c_2 - 3c_3 - 2c_4 - c_5$$

Dove n rappresenta il numero di gradi di libertà, m il numero di corpi componenti la catena cinematica e c_i il numero delle coppie cinematiche di classe “ i ” che compongono il meccanismo; in questo caso $m = 7$ (si considera anche la base non illustrata nella figura), $c_1 = 6$, $c_{2,\dots,5} = 0$, allora il robot sarà caratterizzato da 6 variabili cinematiche indipendenti.

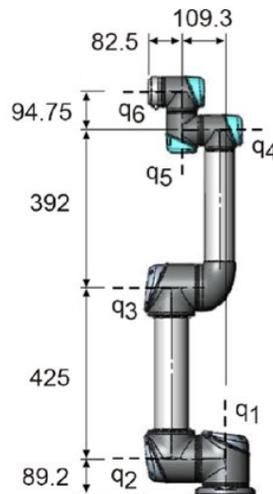


Fig. 6: schema cinematico del braccio robotico

L’ultimo giunto è strutturato in maniera tale da collegarvi diversi utensili; coordinando e programmando, quindi, il movimento di ognuno dei giunti, è possibile definire il movimento dell’utensile, in modo da eseguire uno specifico lavoro.

Altre caratteristiche del cobot sono indicate sulla scheda tecnica in fig. 7.

UR5 Specifiche tecniche

Articolo no. 110105

Braccio robot a 6 assi con raggio di lavoro di 850 mm

Peso:	18,4 kg															
Carico utilizzabile:	5 kg															
Raggio d'azione:	850 mm															
Arco di movimento dei giunti:	+/- 360° su tutti i giunti															
Velocità:	Giunto: Max 180°/s. Utensile: Circa 1 m/s															
Ripetibilità:	+/- 0,1 mm															
Impronta:	Ø149 mm															
Gradi di libertà:	6 giunti rotanti															
Dimensioni dell'unità di controllo (LxAxP):	475 mm x 423 mm x 268 mm															
Porte I/O:	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Scatola di controllo</th> <th>Connettore sul tool</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ingressi digitali</td> <td>16</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Uscite digitali</td> <td>16</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Ingressi analogici</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Uscite analogiche</td> <td>2</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		Scatola di controllo	Connettore sul tool	Ingressi digitali	16	2	Uscite digitali	16	2	Ingressi analogici	2	2	Uscite analogiche	2	-
	Scatola di controllo	Connettore sul tool														
Ingressi digitali	16	2														
Uscite digitali	16	2														
Ingressi analogici	2	2														
Uscite analogiche	2	-														
Alimentazione elettrica di I/O:	24 V 2A nell'unità di controllo e 12 V/24V 600mA nell'utensile															
Comunicazione:	TCP/IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Socket Ethernet & Modbus TCP															
Programmazione:	Interfaccia grafica Polyscope su pannello touch screen di 12 pollici, con staffa di montaggio															
Rumore:	Relativamente priva di rumore															
Classificazione IP:	IP54															
Assorbimento di corrente:	Circa 200W usando un programma tipico															
Funzionamento collaborativo:	15 Funzioni di sicurezza avanzate Funzionamento collaborativo conforme alla norma: EN ISO 13849:2008 PL d EN ISO 10218-1:2011, clausola 5.4.3															
Materiali:	Alluminio, plastica PP															
Temperatura:	Il robot può lavorare nell'intervallo di temperature 0-50°C															
Alimentazione elettrica:	100-240 VAC, 50-60 Hz															
Cablaggi:	Cavo lungo 6 metri da robot a scatola di controllo Cavo lungo 4,5 metri da schermo touch a scatola di controllo															

Universal Robots A/S
 Energivej 25
 DK-5260 Odense S
 Danimarca
 +45 89 93 89 89

www.universal-robots.com
sales@universal-robots.com



Fig. 7 : scheda tecnica UR5 [8]

2.3 Definizione delle leggi

Le leggi di controllo per il cobot sono state trattate come funzioni ad una variabile del tipo $C_r(C_h)$, in cui C_r rappresenta la coppia sviluppata dal robot in funzione di quella applicata dall'uomo sull'ultimo giunto, indicata con C_h .

2.3.1 Legge di controllo a tratti

Come precedentemente accennato, per lo sviluppo di una delle due leggi è stato utilizzato "Matlab", in quanto le condizioni di realizzazione di una di queste risultavano particolarmente complesse.

La prima legge, infatti, presenta, nel primo tratto, un profilo simile ad una legge esponenziale, fino ad un valore massimo (della coppia che il cobot erogherà), in corrispondenza di un valore di C_h di 0.25 (normalizzato), per proseguire poi linearmente fino allo zero. Ciò consente di fornire al soggetto in riabilitazione un grande aiuto nel tratto iniziale, aiuto che andrà decrescendo in maniera lineare fino a far eseguire il movimento interamente al paziente; da qui in poi la funzione varrà 0.

Essendo le coppie in gioco variabili rispetto all'esercizio riabilitativo da eseguire, durante la definizione, la legge è stata normalizzata rispetto ad un valore di coppia generico, in modo che all'occorrenza sarà sufficiente moltiplicare la variabile indipendente per lo specifico valore limite della coppia dell'uomo (si è posto difatti $C_r(x)$, con $x = C_h/C_0$, in cui C_0 indica il limite superiore della variabile C_h , dipendente, per l'appunto, dal tipo di esercizio). La funzione è allora di tipo parametrico, così da garantire una certa versatilità.

Dovendo valere la legge anche per coppie negative la funzione dovrà presentare una certa simmetria rispetto a entrambi gli assi cartesiani; l'andamento desiderato è riportato in fig. 8.

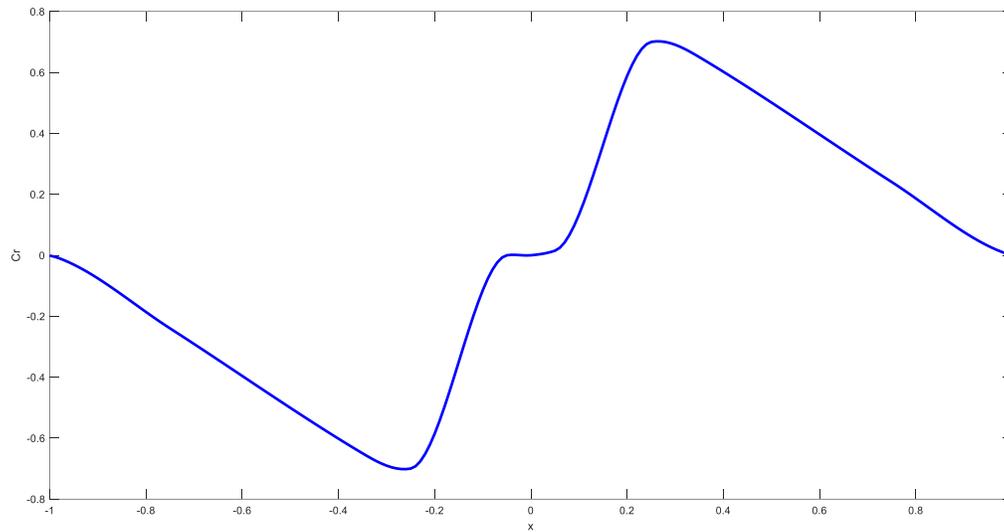


Fig. 8 : Profilo della prima legge

Data la simmetria della funzione, lo studio è stato effettuato per valori positivi della x , per poi ribaltarla rispetto all'asse delle ascisse e delle ordinate.

La struttura della funzione sarà vincolata a punti di passaggio e condizioni sulla derivata prima, entrambi facilmente intuibili dal grafico.

Per il primo tipo di vincolo andranno imposti i seguenti punti di passaggio: • passaggio per l'origine (ossia $C_r(0) = 0$), così che il robot si attivi solo in corrispondenza di uno stimolo dal paziente; • la condizione relativa al massimo valore assunto dalla funzione, ossia $C_r(0.25) = 0.75$; • $C_r(1)=0$, che rappresenta la condizione per cui il robot passa da attivo a passivo; • ulteriori punti di passaggio per garantire un andamento esponenziale nel sottodominio $x = [0; 0.25]$, e lineare nel sottodominio $x = [0.25; 1]$.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia di condizioni è stato imposto: • $C'_h(0) = 0$, in modo da evitare instabilità intorno allo 0; • $C'_h(0.25) = 0$, per garantire la condizione di massimo assoluto; • $C'_h(1) = 0$, così che per valori di ascissa superiori ad 1, il robot mantenga la coppia in output pari a 0, evitando discontinuità della derivata prima che possono portare ad instabilità del sistema.

Un primo approccio è consistito nel cercare una singola funzione polinomiale che soddisfacesse le condizioni di passaggio per i punti, nel fare questo si è fatto ricorso al metodo dei minimi quadrati. Il risultato è illustrato in fig. 9.

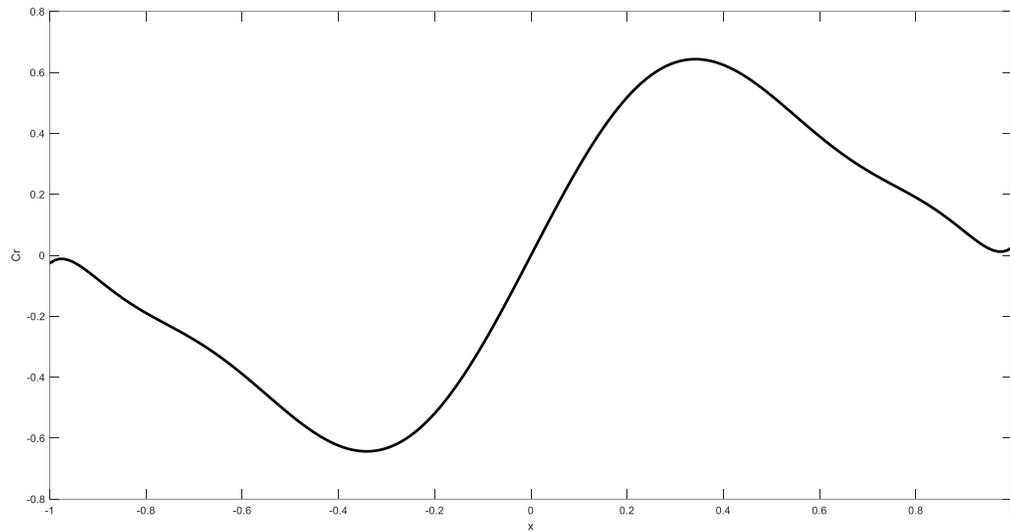


Fig. 9 : Legge di controllo ai minimi quadrati

Le richieste soddisfatte da questo profilo sono il massimo in corrispondenza di un'ascissa a circa 0.25, l'andamento quasi lineare per valori di x da 0.25 a 0.75, seppur con qualche oscillazione, e il passaggio per l'origine.

È evidente come l'equazione, però, non possa essere impiegata per lo scopo, a causa della non tangenza orizzontale in 0 (che, come già accennato, porterebbe ad instabilità) e di un valore diverso da 0 in $x = 1$ che porterebbe ad una discontinuità della funzione, dato che per valori della x superiori ad 1 la funzione dovrebbe avere valore costante pari a 0.

Un secondo metodo per trovare l'espressione analitica, dato che soddisfare le richieste con un solo polinomio è risultato insoddisfacente, è stato usare una funzione polinomiale a tratti, in particolare si è fatto uso delle "splines".

Una "spline" è un tipo di interpolazione di funzioni mediante polinomi, molto usata nel calcolo numerico e in statistica: dato un insieme di n punti di cui si vuole trovare la funzione interpolante, l'insieme viene suddiviso in $n - 1$ sottointervalli, ognuno di questi viene poi interpolato con una funzione polinomiale, di grado p (generalmente si usano polinomi di terzo grado). Una funzione "spline", inoltre, è tale se è derivabile con continuità fino all'ordine $p - 1$, in altre parole la funzione deve essere di classe C^{p-1} [7]. Questa caratteristica risulta di grande utilità per lo scopo prefissato, in quanto le discontinuità della derivata prima risultano particolarmente indesiderate.

Per generare questo tipo di legge è stata adoperata la funzione "GSP" (*General Piecewise Spline Interpolation*) di Matlab, la cui interfaccia, assieme ad un esempio applicativo, è mostrata in fig. 10.

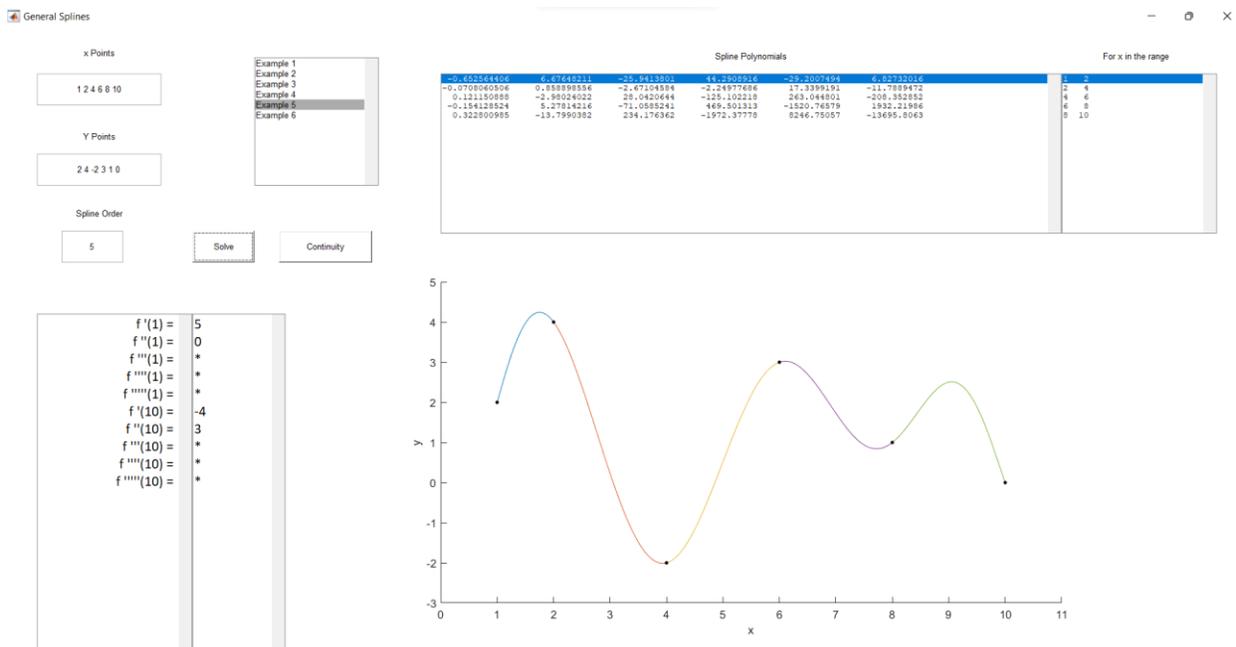


Fig. 10: interfaccia grafica GSP

Questa applicazione è molto versatile, in quanto, è possibile fornire in input l'ordine dei polinomi interpolanti e le condizioni sulle derivate, al più di ordine p (per ordini superiori sono nulle), oltre ad i consueti punti di passaggio. In uscita è poi riportato direttamente il grafico risultante e i coefficienti dei polinomi (sotto la voce "Spline Polynomials") nei rispettivi sottointervalli di interpolazione.

Tramite il tasto "continuity", vengono prodotte in uscita tutte le derivate della funzione interpolante fino all'ordine p (vedi fig. 11), così da poter effettuare controlli sulla continuità della funzione e della sua derivata.

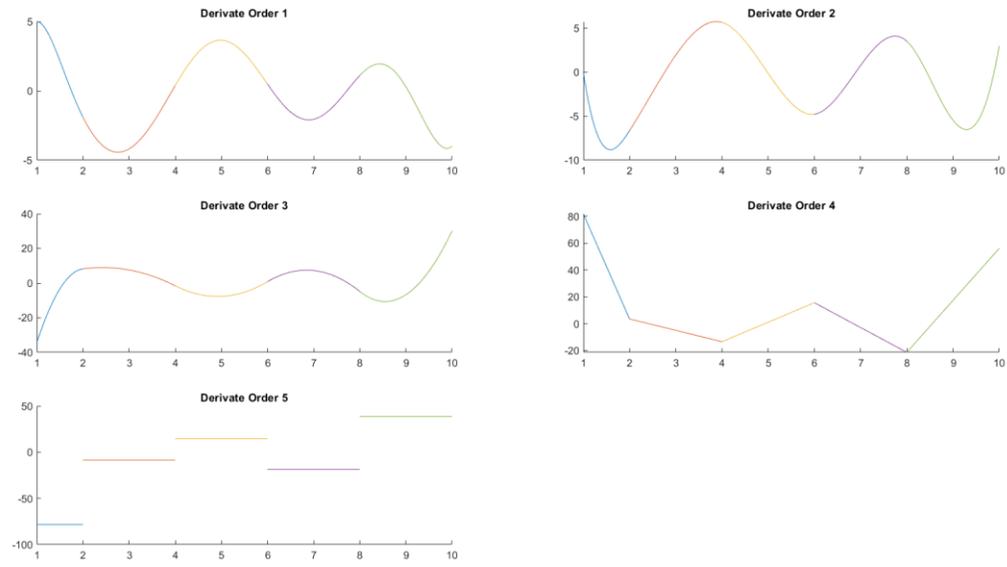


Fig. 11: Funzione "continuity" di GSP

La funzione ottenuta e successivamente utilizzata per l'implementazione è riportata in figura sottostante.

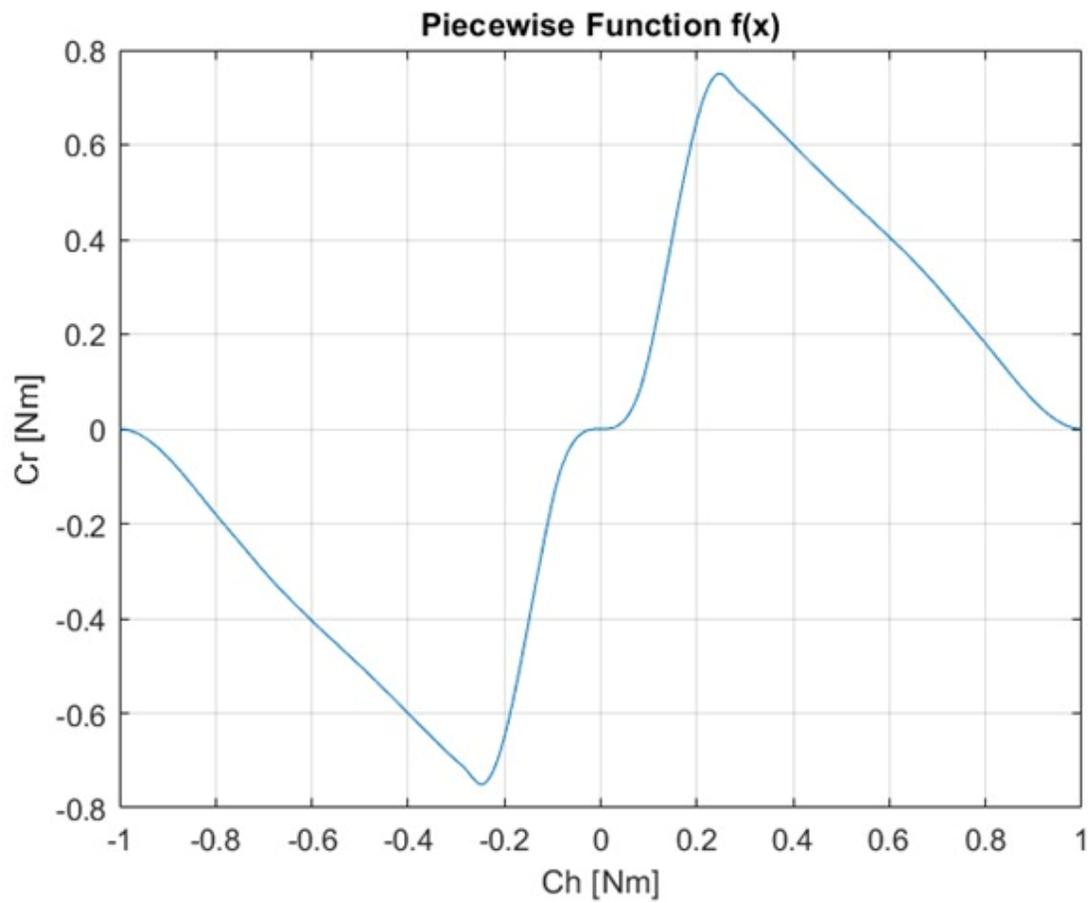


Fig. 12: Funzione a tratti definita tramite GSP

2.3.2 Gain *smooth*

La seconda legge che è stata sviluppata, presenta caratteristiche che ne rendono la realizzazione molto più semplice in termini di calcoli. L'idea, difatti, è quella di fornire al paziente un aiuto crescente, che, superato un certo valore della coppia in input, diventi costante; una rampa con saturazione presenterebbe il profilo desiderato, introducendo però delle spezzate nell'andamento, il quale andrà, quindi, reso liscio.

In figura 13 è mostrato il confronto tra gli andamenti (normalizzati) tra una rampa spezzata e "smooth".

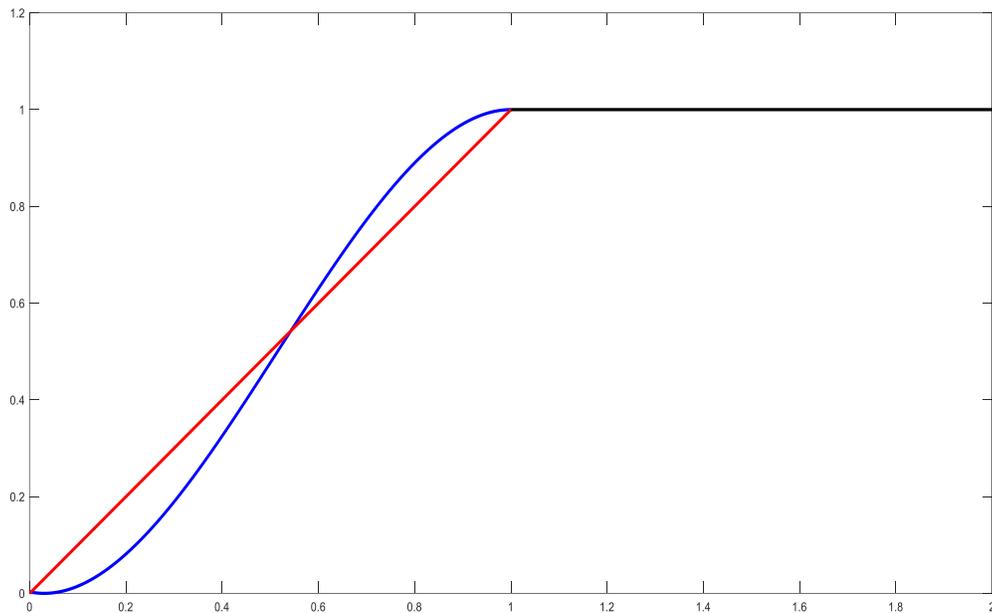


Fig. 13: Gain lineare (in rosso) e liscio (in blu) a confronto

Dal grafico è possibile ricavare che la legge cercata: • può essere modellata come un polinomio di terzo ordine passante per l'origine; • deve presentare tangenza orizzontale in $x=0$ e $x=1$, per stabilità e continuità con la saturazione; • presenti un andamento costante ad 1 per valori di $x \geq 1$, che, nel caso normalizzato, rappresenta la condizione di saturazione.

Generalizzando rispetto al caso normalizzato, per lo studio della legge analitica è possibile strutturarla in maniera parametrica, così da presentare flessibilità in base alla specifica applicazione. I parametri in questione sono: • a valore di saturazione; • b valore di x in corrispondenza del quale si entra in saturazione; • c valore di x il quale determina un sottodominio della variabile indipendente (ossia per $-c \leq x \leq c$) in cui la funzione rimane a 0, nell'applicazione pratica rappresenta il margine di coppia erogata dall'uomo oltre il quale è

possibile considerare lo sviluppo di tale coppia, volontario (si ricorda che la funzione è sempre del tipo $C_r(C_h)$). In figura 14 vi è una visualizzazione del grafico con i relativi parametri.

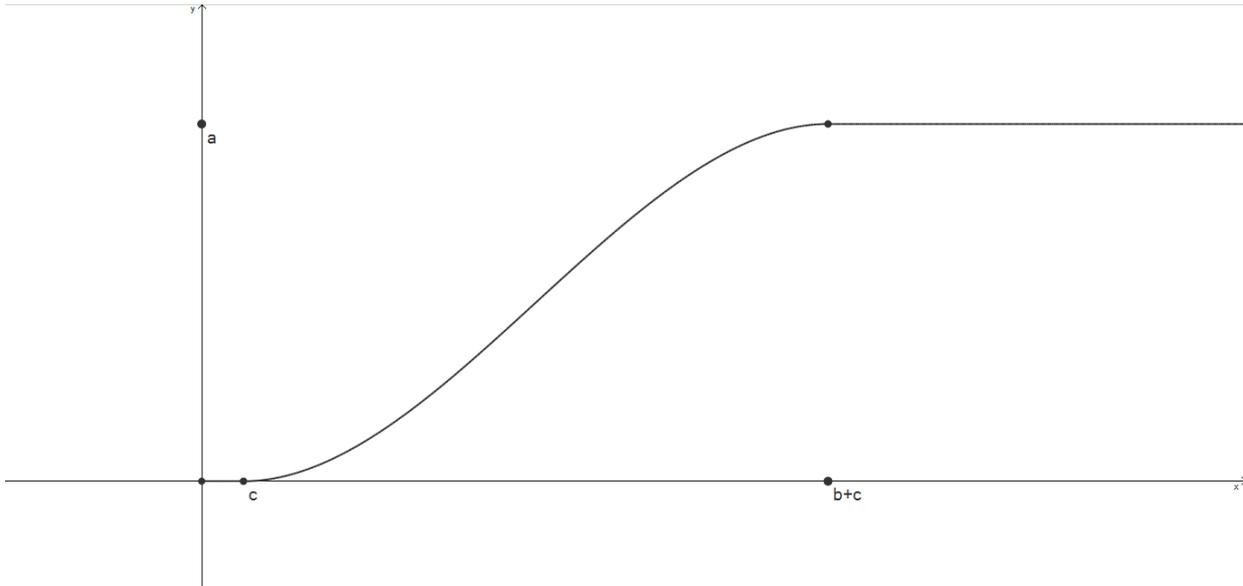


Fig. 14: Grafico della funzione cubica parametrica

I parametri e le condizioni elencate forniscono i vincoli matematici che andranno soddisfatti dall'equazione polinomiale: • $f(0) = 0$; • $f'(0) = 0$; • $f'(b) = 0$; • $f(b) = a$.

In questi legami non compare il parametro c , in quanto corrisponde ad una traslazione del grafico, la quale potrà essere effettuata a valle di uno studio della stessa funzione passante per l'origine (corrispondente al primo vincolo elencato).

Dato il polinomio cubico generico $y = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3$ e poste le condizioni, si ottiene un sistema del tipo:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2b & 3b^2 \\ 1 & b & b^2 & b^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix}$$

Si nota subito che $c_0 = c_1 = 0$, il che era anche intuibile direttamente dai vincoli; il sistema si ridurrà a

$$\begin{bmatrix} 2b & 3b^2 \\ b^2 & b^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix}$$

La cui soluzione risulta essere $c_2 = 3 \frac{a}{b^2}$ e $c_3 = -2 \frac{a}{b^3}$, l'equazione sarà allora

$$y = 3 \frac{a}{b^2} x^2 - 2 \frac{a}{b^3} x^3$$

Applicando la traslazione in c , si ottiene finalmente l'equazione parametrica desiderata

$$(2.2) \quad y = 3 \frac{a}{b^2} (x - c)^2 - 2 \frac{a}{b^3} (x - c)^3$$

L'andamento completo, ossia comprensivo della parte negativa, delle relative saturazioni e della "soglia del volontario", è riportato in fig. 15.

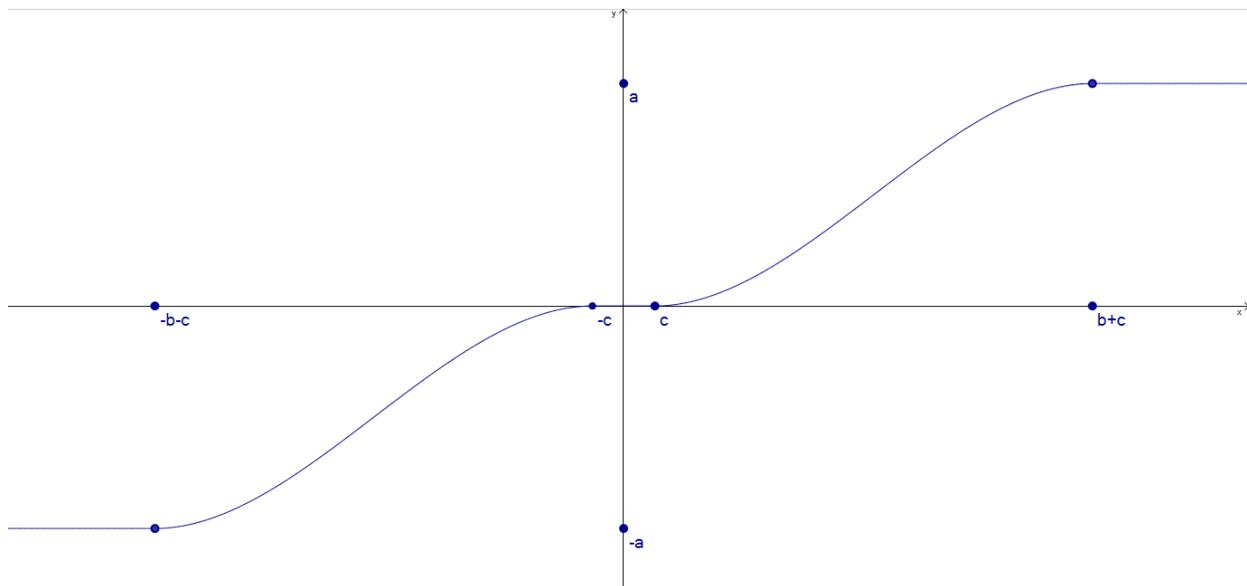


Fig. 15: Legge di controllo gain "liscio"

2.4 Simulink

Una volta trovate, le leggi sono state implementate su "Simulink". Il modello meccanico dell'ultimo giunto del robot è stato schematizzato come un modello massa smorzatore ad 1 grado di libertà (l'effetto molla è considerato trascurabile), ossia un'equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti, del tipo $I\ddot{\vartheta} + \beta\dot{\vartheta} = C(t)$. Con I è stato indicato il momento di inerzia del giunto, con ϑ la variabile cinematica corrispondente al grado di libertà rotazionale del giunto, con β lo smorzamento angolare e con $C(t)$ la coppia in input che comprende l'attività del paziente sommata al contributo del cobot.

I valori dei parametri stimati sono: $I = 0.004 [Kg \cdot m^2]$, $\beta = 2 [N \cdot m \cdot s]$.

Sono stati implementati due schemi, uno per la funzione di controllo a tratti e uno per la legge di controllo cubica con saturazione. Questi sono riportati in figura 16 e 17.

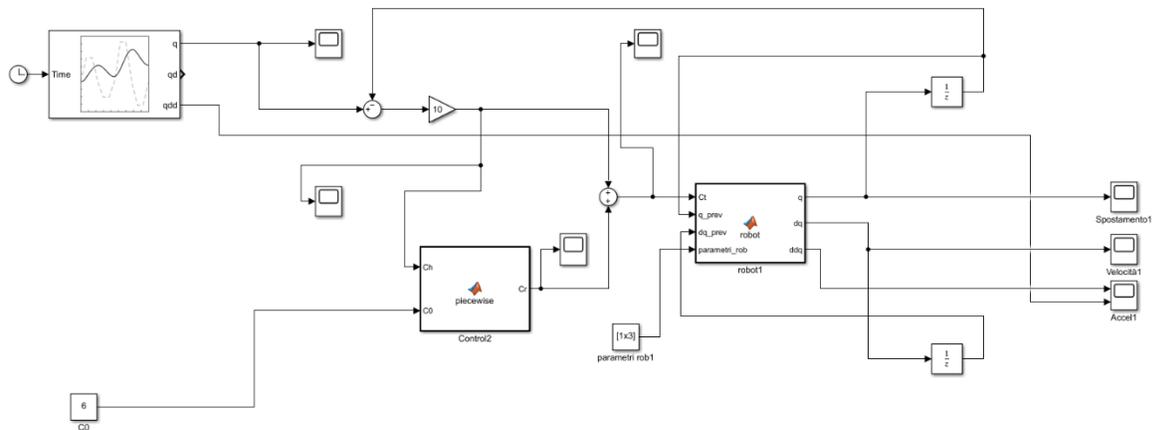


Fig. 16: modello simulink con controllo a tratti

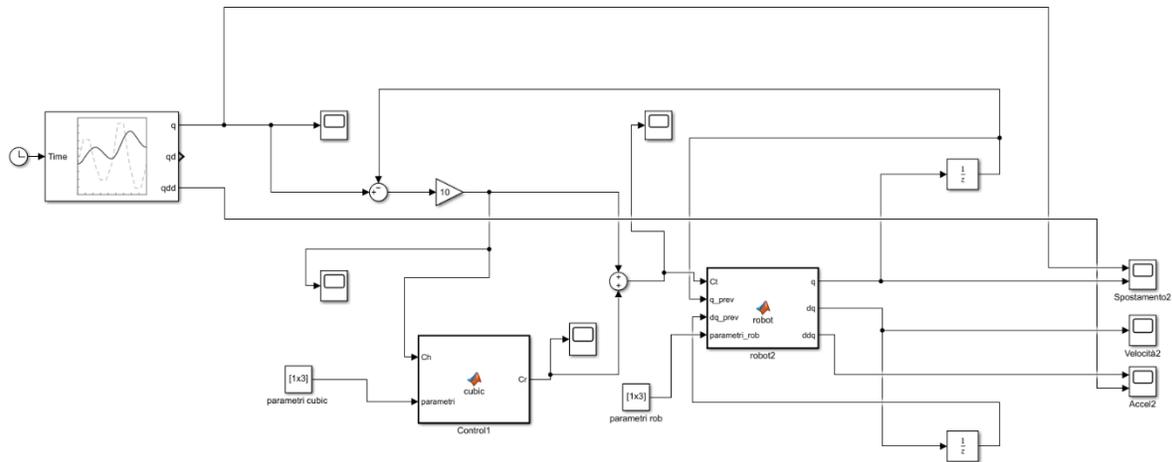


Fig. 17: modello simulink rampa con saturazione

I due schemi sono sostanzialmente uguali, con l'unica differenza che il blocco che costituisce l'equazione di controllo cambia a seconda della legge usata. Come ingresso si è usato un profilo trapezoidale di velocità (che rappresenta l'andamento desiderato) retroazionato, con un opportuno guadagno in serie, in modo da simulare il comportamento in coppia del paziente. Questo segnale viene posto in input al blocco della funzione di controllo ("cubic" o "piecewise" nelle figure) assieme ai parametri caratteristici della funzione: C_0 per la funzione a tratti e a , b e c per la legge cubica (vedasi paragrafi 2.3.1 e 2.3.2). In uscita il suddetto blocco fornirà la coppia calcolata a seconda della legge usata, questa sarà sommata al segnale di coppia dell'uomo e fornito al blocco "robot", che rappresenta il modello dinamico del secondo ordine; in uscita dal blocco sono forniti spostamento (q), velocità (dq) e accelerazione (ddq) del giunto.

I blocchi " $1/z$ " (nominati "Unit Delay"), ritardano l'ingresso per il periodo di campionamento impostato, quindi in uscita al periodo successivo ci sarà l'ingresso ritardato di un'iterazione. È stato impiegato nel blocco "robot" per risolvere l'equazione differenziale tramite un'integrazione numerica.

Grazie a questo modello è stato possibile testare le funzioni di controllo, osservando il comportamento del modello del sistema adottato.

3 RISULTATI

3.1 Software per le acquisizioni

Per l'acquisizione dei dati cinematici e dinamici del cobot è stato impiegato l'“UR Log Viewer”, un software appositamente sviluppato dalla medesima Universal Robots (acronimo: UR) per visualizzazione e lettura dei segnali forniti dai sensori interni al cobot. È uno strumento molto utile per effettuare un'analisi della coppia applicata dal paziente, e valutare, dunque, l'efficacia delle leggi di controllo sviluppate.

È possibile, tramite l'interfaccia dell'applicazione, selezionare la frequenza di campionamento, il tempo di acquisizione e le grandezze che verranno fornite, come mostrato in figura 18.

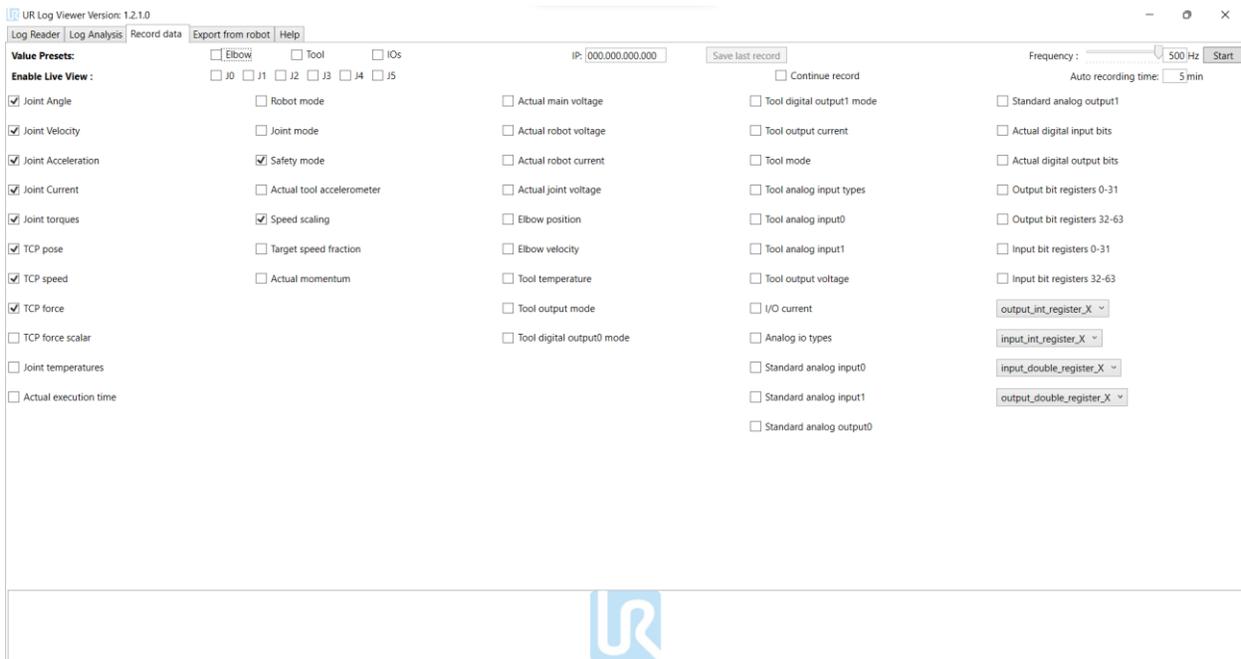


Fig. 18: interfaccia Log Viewer

Questa applicazione è stata usata allo scopo di confrontare lo sforzo applicato dall'uomo nel caso di cobot attivo e nel caso di cobot passivo, nonché effettuare un paragone tra le prestazioni offerte dalle due diverse leggi di controllo.

Non essendo dotato di un sensore di coppia interno che misuri quella sviluppata dal cobot, non è stato possibile effettuare un'analisi diretta dello sforzo del motore; il Viewer mette, comunque, a disposizione la corrente generata, che può essere interpretata per stabilire una misura indiretta.

3.2 Analisi dei dati

Sono state effettuate diverse prove con un ingresso analogo a quello implementato in simulink (a profilo trapezoidale di velocità, vedasi figura 20), così da poter paragonare il modello simulato con i dati empirici; la durata delle singole prove è stata di un minuto, in cui sono state effettuate 7 rotazioni tra 0° e 90° (come mostrato in figura 19), la frequenza di campionamento di 100 Hz per un totale di 6000 campioni acquisiti per ogni prova.

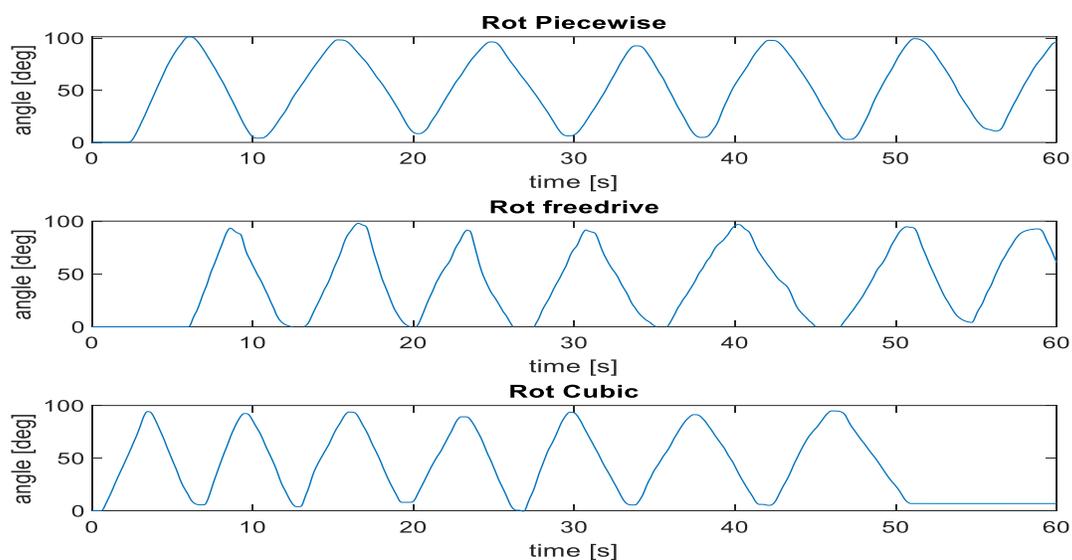


Fig. 19: Spostamento del giunto

3.2.1 Dinamica e cinematica

L'analisi dei dati, relativi alla dinamica, è stata effettuata tramite misure di coppia e della corrente prodotta; per la cinematica è stato invece analizzato lo spostamento dell'ultimo giunto, il cui grafico è riportato in figura sottostante.

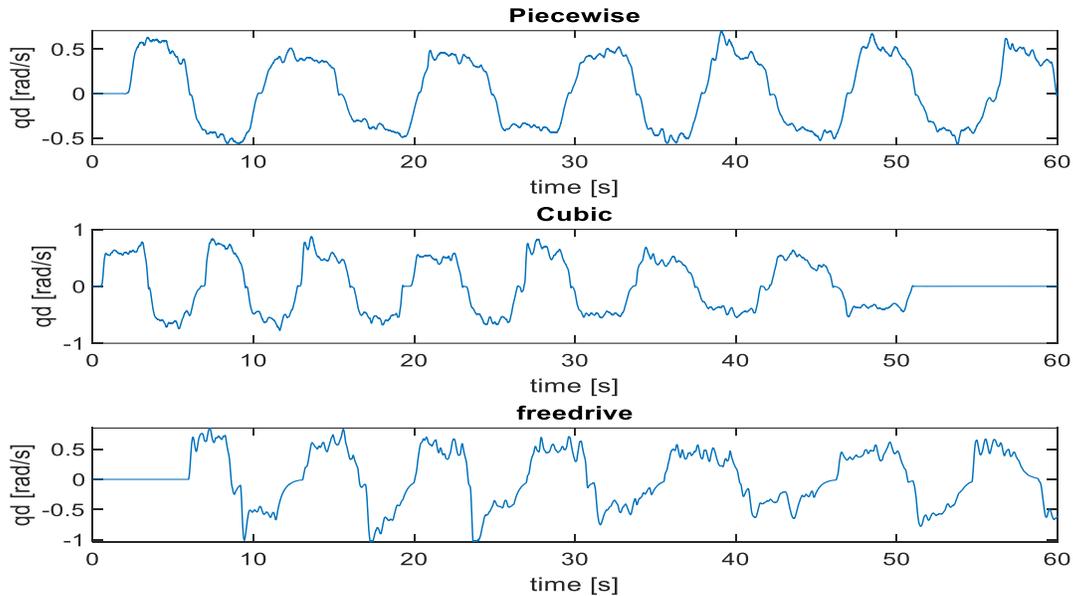


Fig. 20: plot della velocità angolare di 3 diverse prove: controllo attivo (Piecewise e Cubic) e passivo (freedrive)

In figura 21 sono riportati i grafici della coppia dell'uomo (C_h) nei 3 casi presi in esame: • controllo con legge *piecewise*, • controllo con legge cubica, • nessun controllo (cobot passivo).

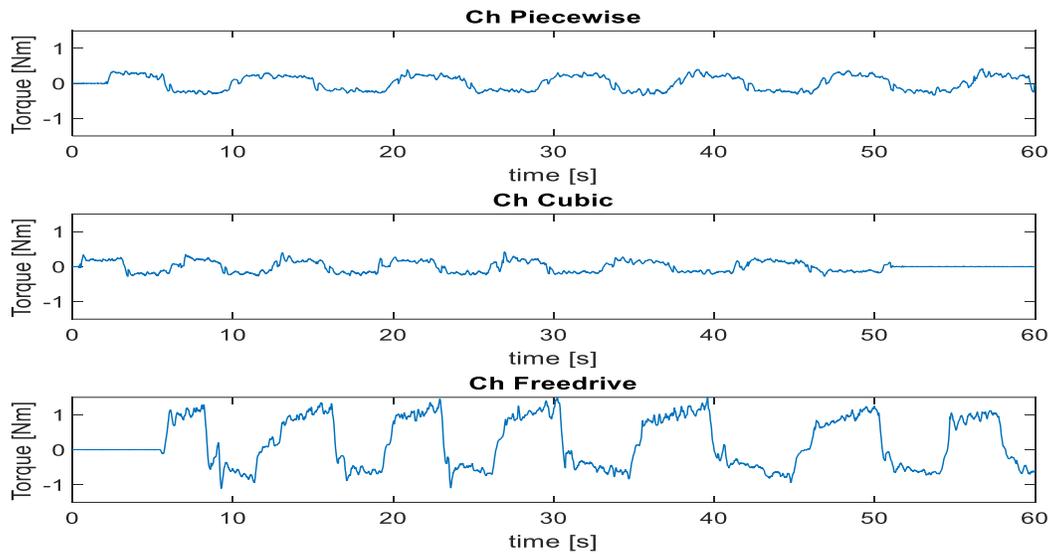


Fig. 21: Plot di Ch nel tempo

Questi grafici confermano visivamente che il cobot fornisce un aiuto concreto, in quanto la coppia applicata dall'uomo, senza aiuto da parte del cobot, è circa tre volte superiore rispetto agli altri due casi. Calcolando le medie dei segnali, effettivamente, si trova: $(0.2, 0.15, 0.54)$ [Nm], rispettivamente, per controllo con legge a tratti, con legge cubica e senza controllo.

Altro aspetto rilevante che è possibile notare è la necessità di applicare, per coppie positive, uno sforzo superiore da parte del paziente; ciò implica che il giunto esercita una resistenza maggiore nel caso di rotazione antioraria. Questo effetto è probabilmente dovuto ad un avvolgimento dei cavi (interni al robot) attorno al giunto.

In tabella 1 è possibile apprezzare numericamente questo aspetto.

Per ottenere una stima del lavoro svolto dal motore, come precedentemente accennato, è stato necessario acquisire il segnale relativo alla corrente generata. I grafici, dei suindicati tre casi, è mostrato in figura 22.

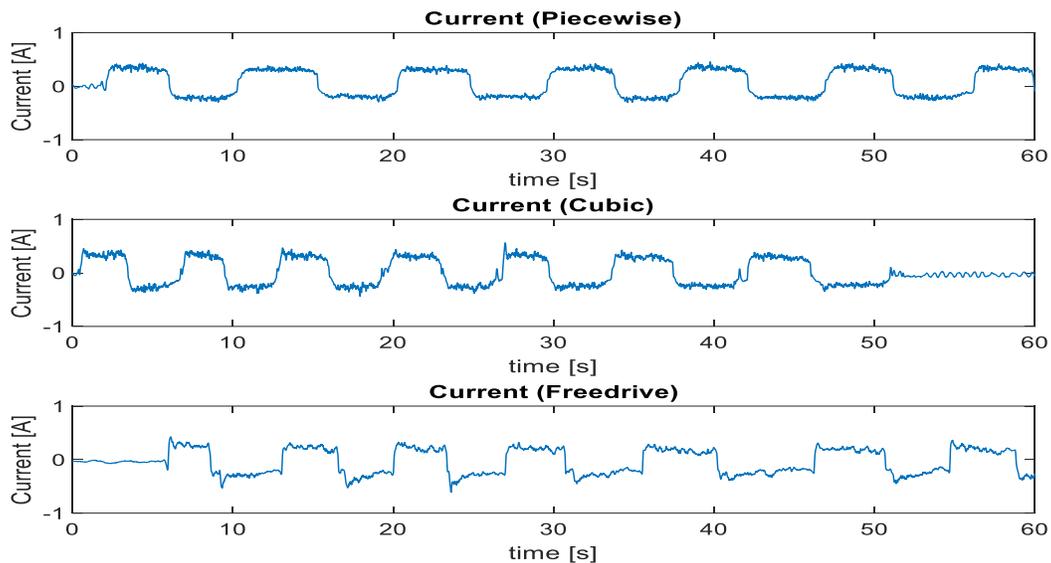


Fig. 22: Andamento della corrente rispetto al tempo

In questo caso i grafici sono molto simili in termini di ampiezze. Si è allora fatto un confronto tra le medie dei segnali., che risultano: • 0.238 [A] per il freedrive, • 0.259 [A] per il controllo a tratti, • 0.250 [A] per il controllo con legge cubica.

In definitiva vi è un incremento, seppur minimo, della corrente erogata passando da freedrive a controllo attivo.

In particolare l'incremento percentuale, riferito alla corrente generata in freedrive, è del 9% per il controllo "cubico" e del 5% per il controllo a tratti; difatti, in conseguenza della saturazione presente nella legge cubica, il motore dovrà sostenere per maggior tempo una coppia in uscita rispetto alla legge a tratti.

Per effettuare un'analisi della coppia erogata e della velocità sviluppata durante lo spostamento, sono state graficate tali grandezze in funzione dell'angolo di rotazione (normalizzato rispetto al suo valore massimo). Gli andamenti dei segnali sono di seguito riportati (figure 23 e 24).

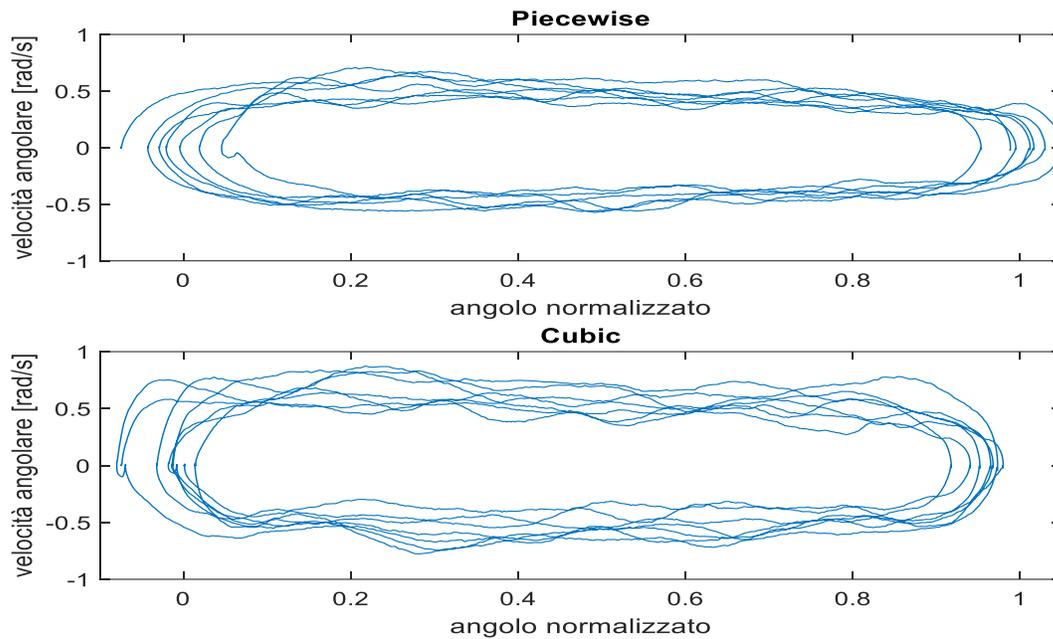


Fig. 23: Andamento della velocità in funzione dello spostamento normalizzato

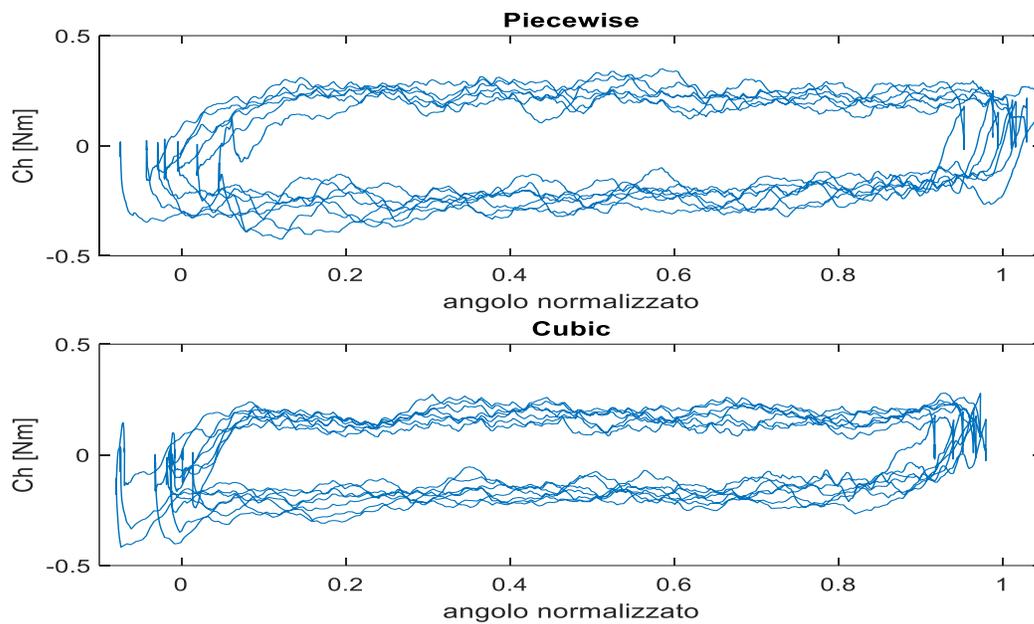


Fig. 24: Andamento di Ch in funzione dello spostamento normalizzato

Da entrambi i grafici si può notare che, per più ripetizioni del movimento, la coppia applicata dall'uomo e la velocità del giunto presentano circa lo stesso andamento, indipendentemente dall'angolo di rotazione.

3.2.2 Analisi senza ingresso

Ulteriori misure sono state effettuate riguardo la stabilità del sistema lasciando l'ultimo giunto indisturbato e misurandone lo spostamento, riportato in figura 25. Si è così verificato che il controllo non generi una coppia senza uno stimolo esterno da parte del paziente.

Frequenza di campionamento e durata dell'acquisizione sono le stesse.

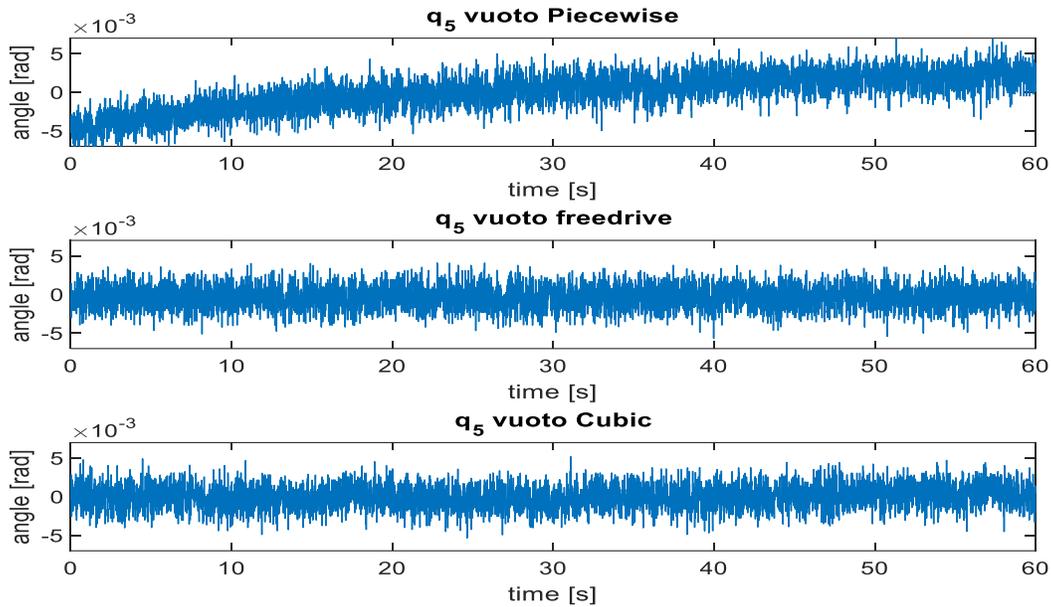


Fig. 25: Spostamento dell'ultimo giunto senza input

Per quest'analisi è necessario un approccio statistico. Sono state, dunque, calcolate le deviazioni standard (in quanto la media nulla è intuibile dai grafici): • 0.0023 per la piecewise, • 0.0024 per la legge cubica, • $2.6104 \cdot 10^{-5}$ per il freedrive.

La stabilità allora è assicurata anche intorno allo 0; inoltre, essendovi nell'applicazione pratica il carico dell'avambraccio del paziente sul giunto, il verificarsi di una condizione di instabilità risulta alquanto improbabile.

3.2.3 Confronto con “Simulink”

Di seguito sono riportati i grafici della coppia dell'uomo acquisita e simulata, così da verificare la bontà del modello definito.

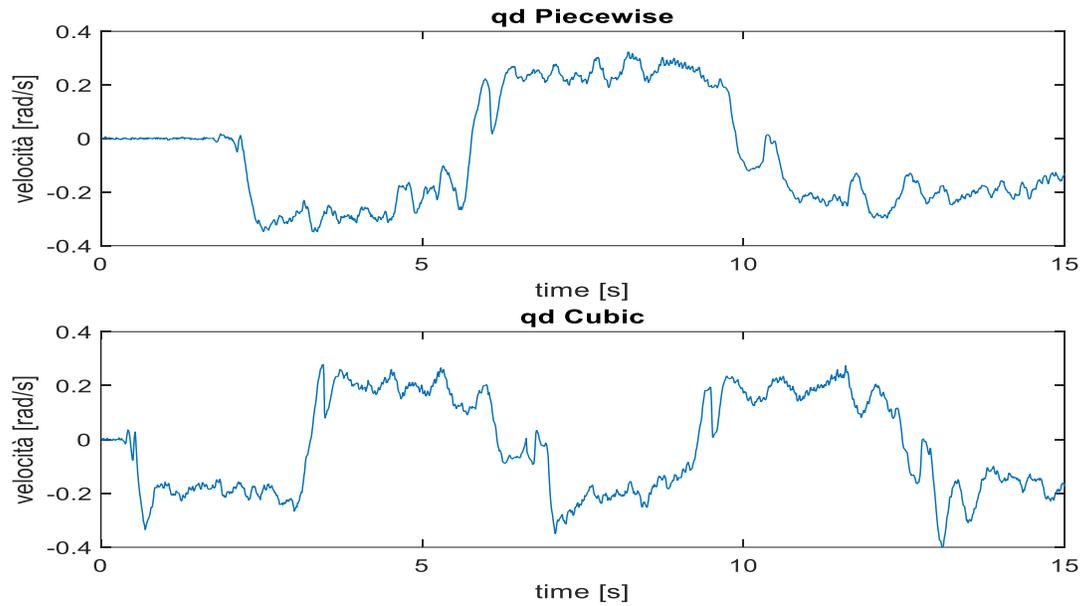


Fig. 26: Coppia dell'uomo reale

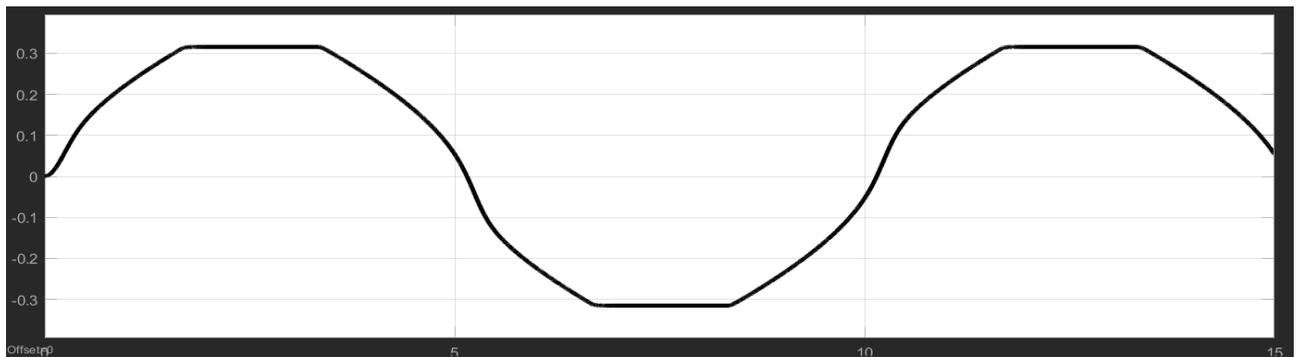


Fig. 27: coppia dell'uomo simulata

In entrambi i casi il modello rappresenta una buona approssimazione della situazione reale.

Confrontando anche gli andamenti dei segnali (simulati e reali) della velocità del giunto, riportati nelle figure sottostanti, si può concludere che il modello, a parte per delle transizioni più ripide, risulta ben definito.

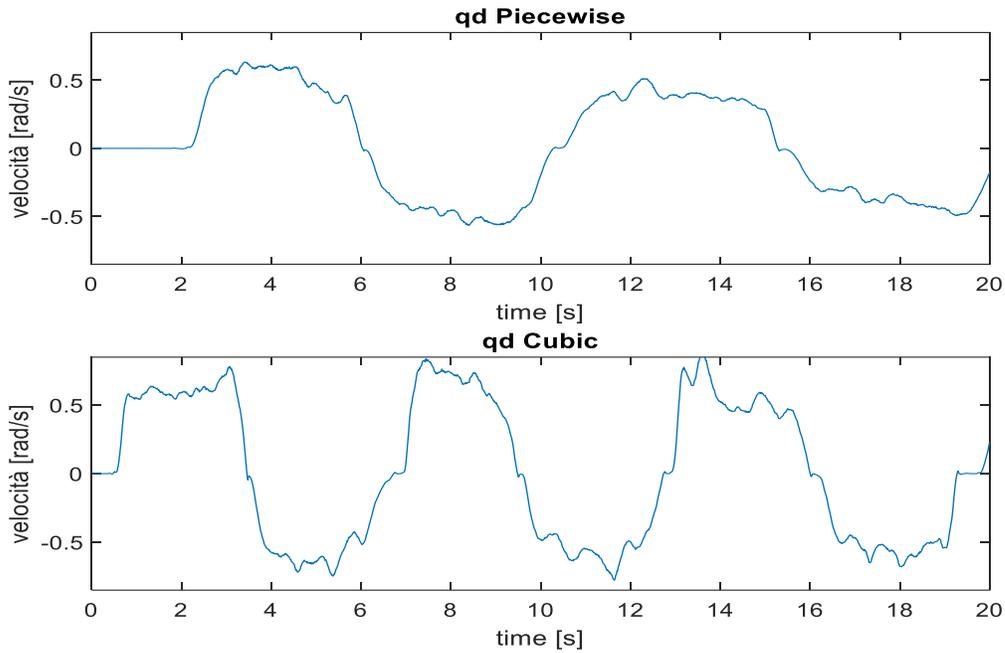


Fig. 28: Velocità dell'ultimo giunto misurata

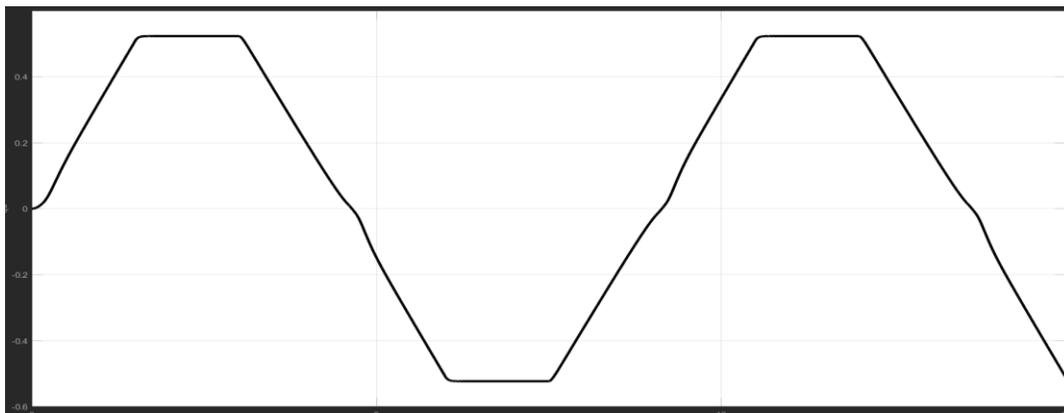


Fig. 29: velocità dell'ultimo giunto calcolata.

3.2.4 Tabella riassuntiva

Viene di seguito riportata una tabella dei parametri caratteristici dei grafici fino ad ora elencati.

Tali parametri sono stati ricavati a seguito del processamento dei segnali acquisiti.

	Piecewise	Cubic	Freedrive
Max Torque (abs) [Nm]	0.4234	0.4168	1.5
Mean Torque (abs) [Nm]	0.2	0.15	0.54
Max Torque [Nm] (counterclockwise)	0.3492	0.2788	0.7605
Max Torque [Nm] (clockwise)	0.4234	0.4168	1.5
Std (vuoto) [rad]	0.0023	0.0024	$2.6104 \cdot 10^{-5}$
Mean current [A]	0.2501 (105%)	0.2588 (109%)	0.2379

Tabella 1: *features* estratte dal processamento dei dati

4 Conclusioni

Nel presente elaborato è stato discusso il processo di definizione delle leggi di controllo, destinate ad attività di riabilitazione neuromuscolare tramite l'impiego di un robot collaborativo, su cui tali leggi verranno installate. Al fine di effettuarne una valutazione delle prestazioni, sono state impiegate risorse software per simulare l'interazione uomo-macchina e per analizzare i segnali sviluppati da tale interazione. Si è potuto ottenere, così, un'idea qualitativa riguardo all'impiego delle leggi nella riabilitazione.

Le richieste di un andamento non scattoso della coppia erogata sono state soddisfatte tramite l'impiego di polinomi del terzo ordine, mentre l'effettivo aiuto della macchina è stato confermato dall'estrazione dei dati relativi alla coppia applicata dall'esterno.

Ulteriori migliorie possono sicuramente essere effettuate lavorando sul profilo delle due leggi sopra enunciate (o crearne di nuove), introducendo forme più articolate, così da permettere un controllo dell'aiuto fornito più minuzioso e applicabile per un maggior assortimento di esercizi riabilitativi. Rifinando il modello definito per le simulazioni, si potrebbero, poi, ottenere stime del comportamento del robot che si avvicinino maggiormente a quello reale, prima di implementare fisicamente le leggi sul cobot.

Per quanto concerne la componentistica, sarebbe opportuno implementare nel robot un sensore di coppia che misuri quella generata internamente, così da avere una misura dell'aiuto fornito in termini numerici e un riferimento più solido per l'efficacia delle leggi sviluppate.

Bibliografia

[1] Ana M. Duric, R. J. Urbanic, J. L. Rickly: A framework for Collaborative Robots Integration in Advanced Manufacturing Systems. SAE International Journal of Materials and Manufacturing , Vol. 9, pp. 457-464 (2016).

[2] F. Sherwani, Muhammad Mujtaba Asad, B. S. K. K. Ibrahim: Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0. International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST), 2020.

[3] Samir Vojić: Applications of collaborative industrial robots. International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials", pp. 96-99 (2020).

[4] <https://www.universal-robots.com/it/robot-collaborativi-o-cobot-cosa-sono-la-guida-definitiva/>

[5] Bo Sheng, Wei Meng, Chao Deng, Shengquan Xie : Model Based Kinematic & Dynamic Simulation of 6-DOF Upper-Limb Rehabilitation Robot. Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, pp. 21-24 (2016)

[6] <https://www.homberger-robotica.com/news/il-ruolo-dei-cobot-nelle-applicazioni-medicali/>

[7] <http://www.mat.unimi.it/users/bressan/materialeZampieri/splines.pdf>

[8] https://www.universal-robots.com/media/50600/ur5_it.pdf