



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

*Sviluppo di un software per l'interfaccia tra un robot collaborativo e un operatore*

*Development of a software for the interface between a collaborative robot and an operator*

Relatore:

Ing. Giacomo Palmieri

Laureando:

Lorenzo Ricciardi

Anno accademico 2019/20

## **Indice:**

### **CAPITOLO 1**

Introduzione	pag 3
1.1. Sviluppo dei robot	pag 4
1.2. Robot Collaborativi per processi di riabilitazione	pag 5
1.3. Struttura del robot	pag 7
1.4. Standard di sicurezza per le operazioni con robot collaborativi	pag 10

### **CAPITOLO 2**

Caratteristiche dei modelli	pag 13
2.1 Modello braccio umano	pag 13
2.2 Interfaccia uomo-robot	pag 15
2.3 Modello braccio robotico	pag 16

### **CAPITOLO 3**

Caso studio	pag 18
3.1 Sviluppo di traiettorie cinematiche	pag 18
3.1.1 Sviluppo traiettorie cinematiche con maniglia cilindrica	pag 20
3.1.2 Sviluppo di traiettorie cinematiche con guanto di supporto	pag 23
3.3 descrizione meccanica della flangia	pag 30

### **CAPITOLO 4**

Conclusioni	pag 33
Bibliografia e sitografia	pag 35

# CAPITOLO1

## Introduzione

Per portare la produzione industriale verso alte prestazioni, un nuovo concetto di robot si sta sviluppando: i robot collaborativi. Questi robot avanzati, anche noti come cobot, sono coinvolti in vari tipi di processi per accelerare, abbreviare e aumentare la produttività. I cobot e gli operatori cooperano nelle attività, combinando robotica e abilità umane, cioè la precisione e la ripetibilità dei robot sincrone con l'intelligenza e la flessibilità umana. Infatti, da subito sono stati adottati non solo in applicazioni industriali, ma anche in campo medico. In particolare, l'affidabilità e la sicurezza dei cobot hanno applicazione nella riabilitazione neuromuscolare.<sup>1</sup> Infatti, al giorno d'oggi a causa dell'aumentare del potenziale scientifico-tecnologico e del rapido invecchiamento della società, che comporta un conseguente aumento di soggetti che necessitano di processi riabilitativi, ad esempio per via di malattie neurodegenerative, molti gruppi di ricerca hanno proposto robot per facilitare il processo di riabilitazione. Dalle misure antropometriche delle escursioni articolari dell'arto superiore si possono realizzare simulazioni cinematiche. Dallo studio cinematico, è possibile estrarre i movimenti dei giunti robotici, e attraverso questi dati, è stato possibile sviluppare algoritmi che riproducessero il movimento umano<sup>2</sup>. I robot tuttavia non sostituiscono il fisioterapista ma lo aiutano nel compimento dei movimenti, in questo modo il fisioterapista è l'unico responsabile del movimento dell'arto superiore.

Questa tesi è incentrata sullo sviluppo di traiettorie uomo-robot per processi riabilitativi adattabili su diversi pazienti. Le traiettorie sono state sviluppate con due tipologie differenti di maniglie in modo tale da affrontare una casistica più ampia, che comprenda cioè anche i pazienti che non hanno forza sufficiente nella mano e che quindi necessitano di un supporto. Inoltre, sono state estratte le coppie sviluppate dai motori all'interno del braccio robotico, grazie alle quali è stato possibile valutare l'impiego di robot differenti. Infine, lo studio si è concluso con la realizzazione in Solidedge di una flangia per il collegamento della parte conclusiva del robot con il guanto di supporto al quale viene assicurato il braccio del paziente.

## 1.1. Sviluppo dei robot

Il concetto di robotica industriale prevede la progettazione, il controllo e l'applicazione di robot nell'industria. Il funzionamento di un robot in impieghi industriali è generalmente incluso in un ambiente strutturato, il cui carattere geometrico o fisico è per lo più noto a priori. Negli anni '60 furono sviluppati i primi robot industriali caratterizzati da versatilità, adattabilità a situazioni sconosciute a priori e precisione di posizionamento. Nel frattempo, il concetto di automazione, che unisce l'esecuzione dell'operazione all'elaborazione intelligente delle informazioni, diventa sempre più diffuso. L'automazione è quindi la sintesi di tecnologie industriali tipiche del processo produttivo e informatica. È essenziale realizzare un sistema di produzione automatizzato e flessibile per avere una forte interazione tra tecnologia informatica e tecnologia industriale. I robot industriali, che sono uno dei punti chiave nell'Industria 4.0, sono componenti tipici di sistemi automatizzati che si sono evoluti considerevolmente negli ultimi decenni. Questi sistemi stanno diventando più, flessibili, versatili, sicuri e collaborativi portando l'automazione industriale verso un cambiamento radicale nei processi di produzione. Significa che la macchina diventa auto-ottimizzante, auto-configurante e persino con intelligenza artificiale che permette di completare i compiti complessi e di raggiungere efficienze maggiori con riduzione dei costi e servizi di migliore qualità. La strategia comune tra le industrie è stata quella di automatizzare prodotti ad alto volume con bassa variante di prodotto. Invece di avere grandi celle robotiche che sono statiche, la tendenza è verso robot collaborativi, cioè unità piccole e flessibili. In questo modo, portano alla luce un nuovo concetto di robotica incentrato sulle attività di cooperazione con gli esseri umani. I robot collaborativi, noti anche come cobot, condividono questo ambiente con l'operatore umano al fine di essere coinvolti nella cooperazione di attività per migliorare la produttività del processo grazie alla combinazione di specifiche capacità umane e robotiche. La collaborazione uomo-robot consente diversi livelli di automazione (in tutto o in parte) e, di conseguenza, un intervento umano opportuno. La coesistenza di robot e umani sembra una soluzione promettente per l'esecuzione dei compiti: la precisione e la ripetibilità del robot sono sincrone con intelligenza e la flessibilità umana. Gli esseri umani e i robot lavorano fianco a fianco su

attività di interconnessione, con l'opportunità di comunicare utilizzando l'interfaccia utente controllata dal dialogo.

## 1.2. Robot Collaborativi per processi di riabilitazione

Un recente campo di applicazione dei robot collaborativi è la riabilitazione neuromuscolare. I sistemi robotici possono essere utilizzati per un processo di riabilitazione motoria in pazienti affetti da malattie neurologiche, del midollo spinale lesioni o ictus. Uno dei principali vantaggi della riabilitazione robotizzata è garantire la migliore riproducibilità e un adeguato monitoraggio degli arti supervisionato dal fisioterapista<sup>3</sup>. Pertanto, i sistemi robotici dovrebbero essere testati per l'efficacia e per identificare l'interazione utile paziente-specialista-robot nell'esecuzione di esercizi individuali e nella creazione di nuovi protocolli di riabilitazione<sup>4</sup>. I robot, a differenza degli umani, raggiungono misure affidabili delle proprietà fisiche con livelli di velocità, precisione, potenza, riproducibilità e resistenza straordinari. Inoltre, anche l'affidabilità nell'esecuzione di compiti ripetitivi è alta. Infatti, i sistemi robotici compensano la forza inadeguata del paziente e forniscono un feedback continuo per la percezione soggettiva del miglioramento. Queste caratteristiche rendono la robotica un potenziale supporto nel campo della riabilitazione sia per i terapeuti che per i pazienti. In questa prospettiva, le prestazioni del motore dovrebbero migliorare in velocità e precisione di movimento grazie alla ripetizione di esercizi calibrati e replicabili in programmi di allenamento intensivo<sup>5</sup>. Dal momento che il quadro clinico del paziente con ictus è davvero complesso, non ci sono generalmente linee guida su come selezionare l'intervento robotico e come personalizzarlo sulle abilità funzionali residue del paziente. Oggi ci sono alcuni dispositivi di riabilitazione sul mercato, come MOTORE e PABLO (1.2,1.3). Il primo dispositivo viene utilizzato per la riabilitazione di braccia e spalle, attraverso la quale il paziente può spostare l'arto su un piano di lavoro ottenendo il feedback visivo. MOTORE è limitato a causa dell'unico movimento ammissibile, cioè un movimento planare. PABLO, al contrario, si basa su sensori wireless utilizzati solo per applicazioni specifiche come la riabilitazione dell'impugnatura forzata senza feedback di forza. Esistono altri dispositivi

specifici solo per la riabilitazione delle dita senza coinvolgere l'intero arto. Negli ultimi anni, il sistema di riabilitazione si sta muovendo verso i robot collaborativi con sistemi di impugnatura sul loro end-effector. Questa procedura promuove lo studio dell'interfaccia uomo-robot, che può essere una semplice maniglia o un guanto con l'uso di telecamere. In questo modo è possibile calcolare movimenti complessi nello spazio. Un importante vantaggio dei robot basati su end effector è che sono facili da adattare a diverse lunghezze del braccio. Inoltre, in base a questa varietà di lesione o al processo di riabilitazione, i robot possono lavorare in tre diverse modalità. La prima è chiamata modalità passiva, nella quale il paziente è rilassato e il robot muove l'arto attraverso una traiettoria predefinita. Nella modalità di assistenza attiva, invece, il paziente innesca l'inizio del movimento con la propria forza che lavora con il robot mentre muove l'arto. Nell'ultima modalità, modalità attiva, il robot fornisce una resistenza viscosa nella traiettoria desiderata mentre in tutte le altre direzioni sono bloccate. L'ultima modalità consente al paziente di raggiungere l'obiettivo con il massimo sforzo.

ROBERT è un robot basato sull'effettore finale già utilizzato nella riabilitazione per la mobilizzazione precoce dei pazienti. Questo robot offre la mobilizzazione attiva (assistivo o resistivo), in cui la funzione e la forza del paziente determinano il livello di attività durante l'esercizio fisico e mobilizzazione passiva per pazienti immobilizzati. ROBERT è molto facile da impostare e utilizzare fornendo un trattamento intensivo senza aumentare i costi del personale. UniversalRoboTrainer della società UniversalRobots, invece, è un altro robot adatto alla riabilitazione di pazienti con lesioni causate da ictus. Infatti, RoboTrainer viene utilizzato come partner di allenamento, poiché gli studi hanno dimostrato che numerose ripetizioni di esercizi di allenamento sono un modo efficace per aiutare il cervello ad imparare a controllare i muscoli paralizzati in modo che l'abilità funzionale ritorni gradualmente. I sensori del robot valutano la quantità di aiuto di cui il paziente ha bisogno, garantendo che l'esercizio sia al livello appropriato richiesto dal paziente. Un altro robot industriale personalizzato allo scopo di riabilitazione è MitsubishiPA-10. È generalmente usato per la riabilitazione dell'arto superiore nei pazienti affetti da malattie neurologiche. I sistemi ottici sono integrati in MitsubishiPA-10 per registrare e acquisire il movimento del braccio allo scopo di analizzare il deficit del paziente e definire dei protocolli di riabilitazione

personalizzati. Il progresso della tecnologia consente di adattare il robot in risposta al comportamento del paziente in modo dinamico. Da molti studi e prove si deduce che i robot collaborativi nel processo di riabilitazione possono migliorare la qualità dell'esercizio fisico. Inoltre, grazie al movimento tridimensionale è possibile trattare tutte le articolazioni dell'arto superiore. In particolare, il tempo di recupero con il robot è più veloce della terapia tradizionale, specialmente nei movimenti come la flessione dell'avambraccio o l'adduzione della spalla. Inoltre, l'impatto economico è moderato, perché sono disponibili cobot a costi relativamente bassi (intorno ai 30K€). L'automazione dell'allenamento riabilitativo per l'arto superiore attraverso sistemi robotici è stata proposta per incrementare il numero di ripetizioni e di esercizi senza sovraccaricare di lavoro i fisioterapisti e per massimizzare l'attenzione e lo sforzo dei pazienti. Nella maggior parte dei casi, la terapia robotica può essere associata con ambienti di gioco computerizzati per fornire un contesto più stimolante. Questo approccio facilita e velocizza l'apprendimento del soggetto. Invece, questa nuova terapia può accorciare il ricovero del paziente, che significa minor costi del trattamento per il sistema sanitario. L'uso di robot nel campo medico garantisce un'alta qualità del trattamento e del monitoraggio dei processi di riabilitazione nel tempo, promuovendo così l'indipendenza e il recupero delle capacità da parte del paziente.

### 1.3 Struttura del robot

Il robot è una macchina in grado di modificare l'ambiente in cui opera, attraverso azioni che sono condizionate da determinati ruoli di comportamento intrinseci nella macchina, nonché da alcuni dati che il robot acquisisce dal suo stato e dall'ambiente.

Il sistema robotico è un sistema complesso caratterizzato da più sottosistemi: il sistema meccanico, il sistema di azionamento, il sistema di controllo e il sistema di rilevamento. Il sistema meccanico è il componente essenziale che coinvolge l'apparato di manipolazione (bracci meccanici, dispositivi di estremità e mani artificiali). La struttura di un robot manipolatore è costituita da una sequenza di corpi rigidi, noti come LINK (collegamenti) che sono interconnessi da articolazioni dette giunti. L'articolazione tra due collegamenti

consecutivi produce un movimento rotatorio se l'articolazione è un'articolazione voluta o un movimento traslazionale se l'articolazione è prismatica. I robot hanno tipicamente forme antropomorfe come il braccio umano con la loro struttura generalmente fissata e utilizzata principalmente nelle attività di cooperazione. Queste macchine, che comprendono un braccio, una sezione del polso e una sezione della mano, sono in grado di eseguire movimenti complesse e agili. Infatti, il braccio robotico garantisce mobilità alla macchina, il polso conferisce destrezza e l'effettore finale svolge il compito desiderato. In genere i cobot presentano una base fissa, attorno alla quale si verifica il movimento del robot. L'esecuzione di un'azione robotica è data dal sistema di attuazione, che anima i componenti meccanici dei robot convertendo l'energia in movimenti meccanici. In particolare, il sistema di attuazione comprende:

- un alimentatore
- un amplificatore di potenza
- servomotore
- una trasmissione

L'alimentazione è fornita dalla sorgente primaria e l'amplificatore di potenza modula il flusso di potenza, che viene erogato per le prestazioni di movimento desiderate. L'attuazione del movimento articolare è assegnata ai motori (servomotori) che consentono la realizzazione del movimento desiderato per il sistema meccanico. I servomotori possono essere pneumatici, idraulici ed elettrici. Poiché i motori del robot devono avere una buona tracciabilità della traiettoria e precisione di posizionamento, dovrebbero avere bassa inerzia, elevato rapporto peso / potenza, ampio intervallo di velocità, elevata precisione di posizionamento e un'increspatura a bassa coppia in modo da attestare la rotazione continua anche a bassa velocità. La trasmissione, invece, trasferisce la potenza meccanica dal motore al giunto. Il robot è influenzato dai requisiti di potenza, dal tipo di movimento desiderato e dalla posizione del motore rispetto al sistema. Infatti, la trasmissione può convertire l'uscita dei motori in modo quantitativo (velocità e coppia) e in modo qualitativo (per esempio un movimento rotatorio attorno all'asse del motore in un movimento traslazionale del giunto). Pertanto, tutto il sistema di azionamento è correlato al sistema di controllo del movimento associato al sistema di azionamento (servomotori, azionamenti e trasmissioni). Il sistema di



controllo è il sistema che comanda l'esecuzione di azioni rispetto agli obiettivi stabiliti dalla pianificazione dell'attività. L'azione di controllo viene generalmente eseguita da circuiti di retroazione per raggiungere la posizione desiderata. Il sistema di rilevamento, invece, è in grado di percepire lo stato interno del robot e lo stato esterno dell'ambiente. Lo stato interno è acquisito da sensori propriocettivi (ad es. Trasduttori di posizione), mentre quello esterno è ottenuto da sensori esteroceettivi (ad es. sensori di forza e telecamere). I trasduttori di posizione forniscono un segnale elettrico proporzionale allo spostamento lineare o angolare del sistema meccanico in relazione a una data posizione di riferimento. I più comuni di questo tipo sono encoder e resolver. I sensori di forza, invece, misurano lo sforzo indotto dalla forza o dalla coppia applicata a un oggetto estensibile. È anche possibile ottenere in misure dirette di forza con la stima di piccoli spostamenti. I sensori di visione (telecamere) misurano l'intensità della luce riflessa da un oggetto. L'obiettivo di tutti questi sensori è quello di estrarre le caratteristiche che caratterizzano l'interazione del robot con gli oggetti nell'ambiente per migliorare il grado di autonomia del sistema. I robot sono spesso classificati in base al numero di gradi di libertà (gdl) che garantiscono l'esecuzione dell'attività. Poiché l'attività programmata di solito comporta la posizione dell'oggetto e orientamento nello spazio tridimensionale, il robot è caratterizzato da sei DOF: tre per la posizione e tre per l'orientamento. La complessità del robot aumenta con l'aumentare del numero di DOF. Se sono disponibili più DOF, rispettare il numero minimo richiesto eseguire un determinato compito, il robot è ridondante e diventa più flessibile e versatile. Infatti, i manipolatori con sei DOF possono avere delle difficoltà come singolarità o spazio di lavoro ostruito. Pertanto, il braccio robotico dei sette DOF, come braccio umano, costituisce una struttura eccellente. Uno dei principali vantaggi di una struttura ridondante è che si possono facilmente evitare collisioni con ostacoli più vicini al manipolatore, con conseguente aumento delle traiettorie percorribili e quindi un miglioramento del processo stesso. D'altra parte, l'analisi di un manipolatore ridondante è più complessa rispetto a un sistema non ridondante.

## 1.4. Standard di sicurezza per le operazioni con robot collaborativi

Poiché gli umani e i robot interagiscono in stretta vicinanza sono necessari standard per le operazioni collaborative, per garantire la sicurezza umana e il corretto funzionamento della macchina. Per ottenere il minimo rischio, non sono analizzati solo i casi di semplice collisione tra uomo e robot ma ogni possibile scenario nel quale il braccio robotico può colpire una persona. Attività standard, comprendenti l'adozione di valutazione dei rischi e la convalida dei sistemi di controllo sono condizioni necessarie per l'esecuzione in sicurezza delle operazioni collaborative. Per questo motivo, le aziende e gli operatori devono rispettare procedure di sicurezza e standard di affidabilità. La Direttiva macchine (2006/42 / CE) emanata dai parlamenti europei prevede un livello di protezione uniforme della sicurezza e della protezione della salute delle macchine. La direttiva spiega innanzitutto l'impatto economico e sociale delle macchine. Quindi, si concentra maggiormente sulla valutazione del rischio e sull'attuazione delle misure di sicurezza risultanti. ENISO12100 è lo standard generale per la sicurezza delle macchine, invece, uno standard più specifico per i robot industriali è ENISO 10218-1 ed ENISO10218-2 sviluppato da un comitato di esperti del settore. La prima parte di questa norma ISO relativa al robot stesso, mentre ENISO10218-2 specifica tutti i prerequisiti di sicurezza per l'integrazione del robot che descrivono situazioni pericolose e forniscono requisiti per ridurre i rischi. Questo standard, con riferimento al possibile movimento e spazio del robot, presenta le seguenti definizioni:

- Spazio massimo: è lo spazio che può essere spazzato dalle parti mobili del robot più lo spazio che può essere spazzato dall'effettore finale.
- Spazio protetto: è lo spazio definito dai dispositivi di protezione sicura perimetrale.
- Spazio limitato: è una porzione dello spazio massimo limitato dai dispositivi che stabiliscono limiti.
- Spazio operativo: è una porzione dello spazio limitato effettivamente utilizzato durante l'esecuzione di tutti i movimenti comandati dall'attività.

Questi standard sono le linee guida di base per rilevare e valutare possibili pericoli per ridurre il rischio di incidenti. Fondamentalmente l'identificazione del rischio, nota come analisi del rischio, viene eseguita combinando le modalità operative con tutte le attività

possibili, anche robot imprevedibili e comportamenti dell'operatore. Quindi, la valutazione del rischio viene condotta in base alla probabilità di guasti pericolosi. In definitiva, i possibili rischi sono ridotti da diverse misure di protezione. Tutta la procedura viene ripetuta iterativamente fino a quando il rischio residuo è minimo o non appartiene al livello accettabile. Dalla norma ENISO10218 manca di valori soglia per il contatto uomo-robot, l'Organizzazione Internazionale di Standardizzazione ha pubblicato la ISO / TS15066: 2016 (Robot e dispositivi robot -Collaborativa Robot), una specifica tecnica in grado di aggiornare gli standard di sicurezza dei robot esistenti. Questo non è uno standard, quindi fornisce indicazioni e non requisiti. Prima le specifiche presenta un'identificazione generale del rischio e una valutazione sulla collaborazione uomo-robot. Quindi, vengono visualizzate molte condizioni per le applicazioni di sistema di robot collaborativo. Questa cooperazione è anche limitata a uno spazio di lavoro collaborativo definito come lo spazio in cui robot e umani possono svolgere compiti contemporaneamente. Quattro diverse procedure di sicurezza di base sono evidenziate nella collaborazione uomo-robot:

- Arresto monitorato classificato di sicurezza: il robot si ferma quando l'operatore si trova nello spazio di lavoro collaborativo e continua il suo processo quando l'operatore ha lasciato il collaborativo
- Guida manuale: i movimenti del robot sono controllati manualmente dall'operatore nell'area di lavoro collaborativa, ad esempio da un dispositivo guida manuale.
- monitoraggio della velocità e della separazione: la velocità di movimento del robot può aumentare o diminuire in base alla distanza tra operatore e robot. Inoltre, se la distanza scende al di sotto di una distanza di separazione minima di protezione dall'operatore, il robot si ferma.
- Limitazione di potenza e forza: le forze di contatto tra operatore e robot sono tecnicamente limitate a un livello di sicurezza.

Questi quattro principi base di protezione nella collaborazione uomo-robot sono utilizzati in molte aree applicative, ad es. nel processo di fabbricazione in cui è necessario correggere potenza e forza. Di conseguenza, potrebbero esserci diverse soluzioni all'interno dei requisiti standard con risultante differenza nel livello di sicurezza. Ad esempio, più robot di piccole dimensioni potrebbero essere più appropriati di un robot grande e pesante perché la loro

energia cinetica è inferiore a quella del robot grande. Pertanto, quando entrambi i robot si muovono alla stessa velocità, i robot piccoli risultano meno dannosi a un essere umano in caso di collisione. Esiste anche lo standard ENISO9283, che non è direttamente correlato alle procedure di sicurezza, ma è costituito da criteri di prestazione e relativi metodi di prova nella manipolazione di robot industriali.

## CAPITOLO 2

### Caratteristiche dei modelli

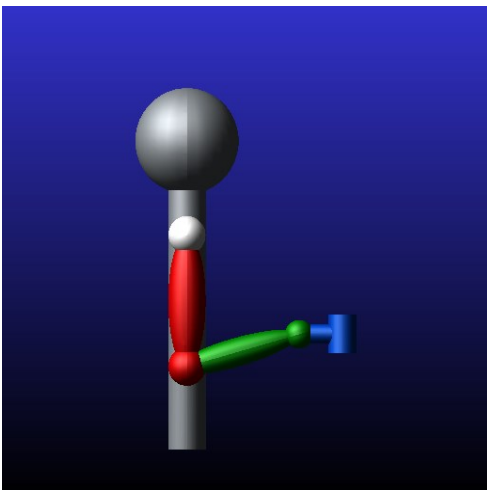
In questo studio sono stati utilizzati vari software e modelli. I primi, sono stati necessari per lo sviluppo degli algoritmi che definiscono le traiettorie che il cobot deve compiere. I secondi, invece, sono stati fondamentali per simulare il comportamento e i movimenti sia del braccio umano sia del braccio robotico. Le traiettorie sono state sviluppate in MATLAB e integrate con i diversi input, tramite in ambiente SIMULINK. Mentre, per la modellizzazione del braccio umano e del cobot sono stati utilizzati modelli CAD preesistenti. Questi modelli riproducono fedelmente le caratteristiche e il comportamento del braccio umano e del braccio robotico, rappresentando così un valido strumento su cui fare affidamento per le simulazioni dinamiche. Inoltre, per poter eseguire le simulazioni con il secondo tipo di maniglia, è stato necessario sviluppare un dispositivo che fungesse da interfaccia tra l'end-effector del robot e il resto del braccio robotico. Per questo motivo è stato utilizzato SOLIDEDGE, un programma di disegno tecnico, attraverso il quale è stato possibile realizzare tale dispositivo.

#### 2.1 Modello braccio umano

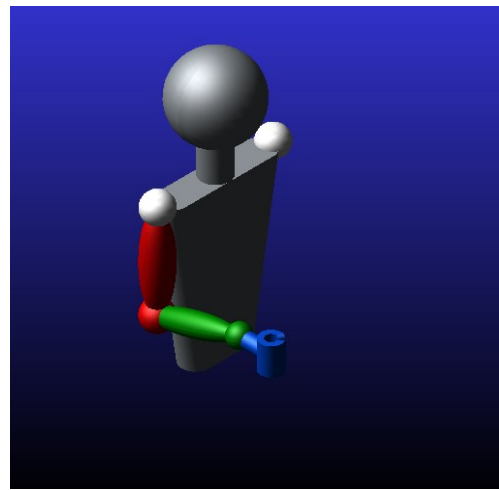
Il braccio umano presenta naturalmente tre articolazioni (spalla, gomito, polso), approssimabili con giunti meccanici. In particolare, la spalla è semplificata con un giunto sferico che conferisce tre gradi di libertà. Il gomito ed il polso visti come giunti universali conferiscono rispettivamente due gradi di libertà. Dunque, il modello, come il braccio umano, ha in totale sette gradi di libertà.

In questa tesi, il braccio umano è stato schematizzato attraverso un modello CAD basato sulle misure antropometriche di un uomo di altezza 1.70m e peso 70kg. Le articolazioni sono state ricreate utilizzando l'effetto combinato di più giunti con un unico grado di libertà rotazionale, intorno ad uno degli assi principali di rotazione, in base al numero di gdl

complessivi dell'articolazione. Nello studio sono state utilizzate due diverse tipologie di interfaccia uomo-robot, cioè maniglia e guanto, per questo motivo è stato necessario adattare il modello del braccio umano cambiando il tipo di schematizzazione della mano. Nel primo caso, con l'end-effector del robot a forma di maniglia, la mano è stata modellizzata tramite un semplice cilindro cavo all'interno del quale è stata posta la maniglia (immagine 1). Nel secondo caso studiato, invece, l'end-effector è a forma di guanto; per questo motivo è stato necessario utilizzare un modello più complesso e che fosse il più vicino possibile alla realtà. Per questo motivo è stato utilizzato un modello che ricreasse in modo fedele un avambraccio e una mano umana. Inoltre, dato che il guanto blocca l'articolazione del polso, il secondo modello non presenta gdl nell'articolazione avambraccio-mano, che sono stati rappresentati come un unico blocco (immagine 2).

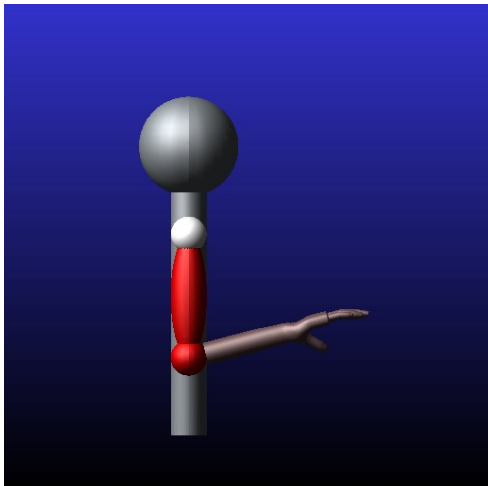


a

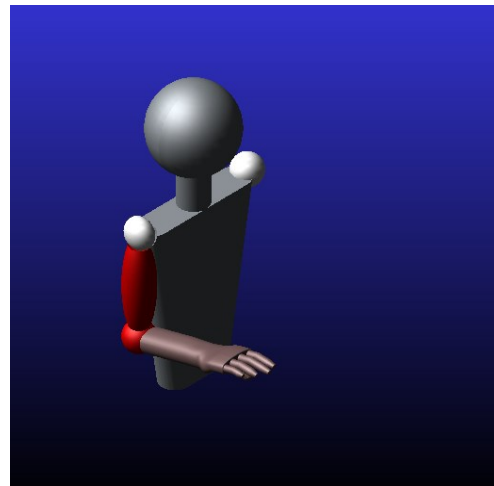


b

*Immagine 1a-b: modello ADAMS del braccio umano con mano modellizzata a forma di cilindro cavo, visione laterale (a) e visione isometrica (b).*



a

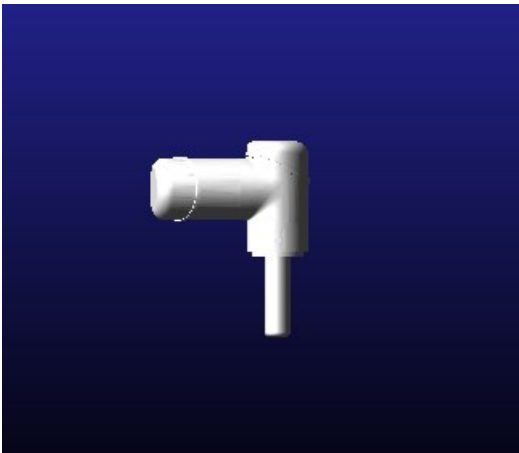


b

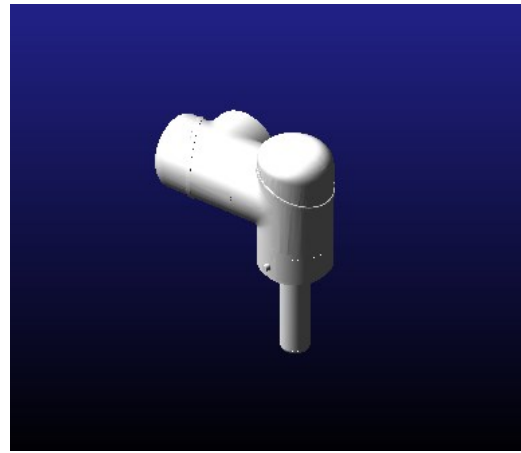
*Immagine 2a-b: modello ADAMS del braccio umano con modellizzazione della mano, visione laterale (a) e visione isometrica (b).*

## 2.2 Interfaccia uomo-robot

In questo studio, sono state utilizzate due tipologie differenti di interfaccia uomo-robot. La prima, attorno alla quale il paziente stringe la mano, è un semplice cilindro che termina il braccio robotico. Questa tipologia di interfaccia è molto semplice ma richiede che il paziente possieda forza sufficiente nella propria mano per restare agganciato, infatti, è stata pensata per pazienti meno gravi o che si trovano in una seconda fase di riabilitazione e che quindi presentano già parte delle capacità neuromuscolari nella mano e nel braccio. Tuttavia, se il paziente ha bisogno di un sostegno, è possibile inserire un supporto a strappo capace di avvolgere la mano e di fissarla alla maniglia (immagine 3). Il secondo sistema, più complesso, non richiede alcuno sforzo da parte del paziente, per questo motivo è stato pensato per una prima fase di riabilitazione dove al paziente è richiesto esclusivamente uno sforzo passivo, al fine di riabituarlo i muscoli al movimento. Costituita da un guanto nel quale il paziente va ad inserire l'avambraccio, che viene assicurato con un sistema di fasce, questa seconda tipologia permette il movimento del braccio senza sforzi da parte del paziente, ma blocca completamente il polso, tuttavia, lasciando le dita completamente libere, ne permette una parziale riabilitazione (immagine 4).

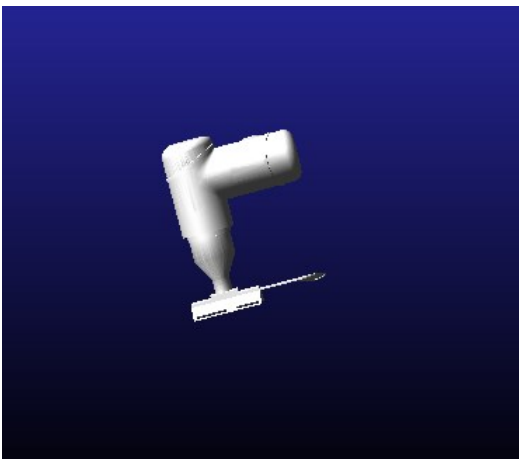


a

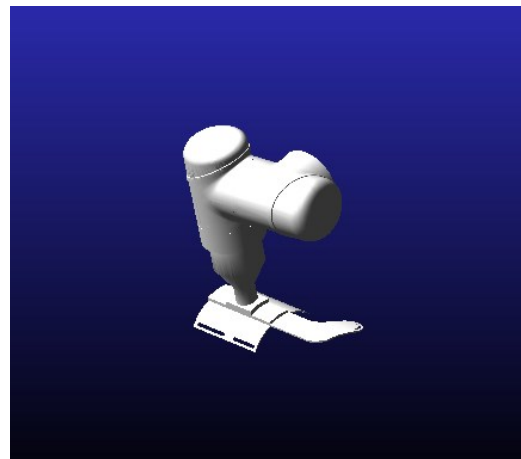


b

*Immagine 3a-b: end-effector a forma di maniglia cilindrica in ADAMS, visione frontale (a) e isometrica (b).*



a



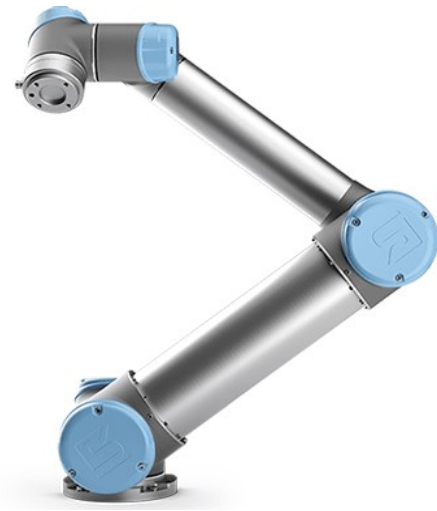
b

*Immagine 4a-b: end-effector con guanto in ADAMS, visione frontale (a) e isometrica (b).*

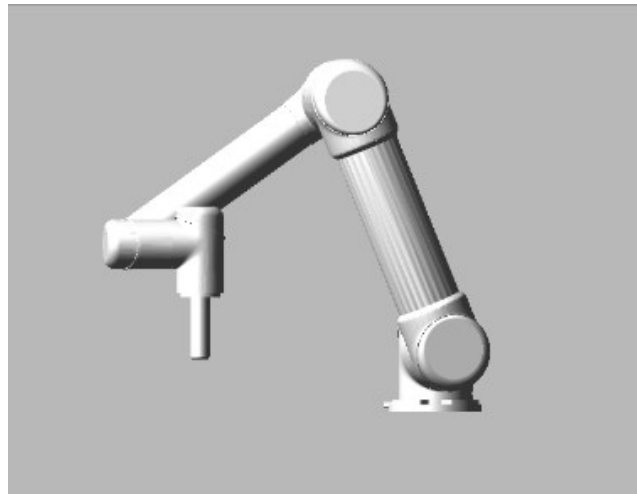
## 2.3 Modello del braccio robotico

Il modello robotico utilizzato per le simulazioni in ADAMS è basato sul robot UR5 della Universal Robot. Il modello, come il cobot, presenta 6 giunti, ognuno dei quali conferisce 1 gdl rotazionale e presenta un range di mobilità di  $+360^\circ$ , fornendo così al braccio robotico un totale di 6 gdl rotazionali che gli garantiscono un'elevata mobilità (immagine 5).

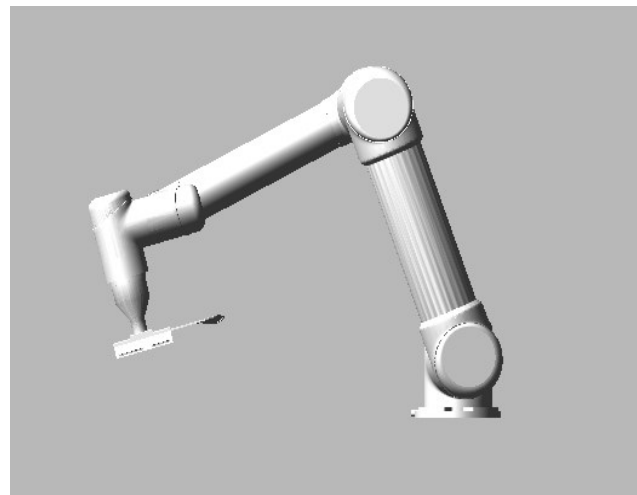




a



b



c

*Immagine 5a-b-c: braccio robotico UR5 (a), modello braccio robotico in ADAMS con maniglia cilindrica (b), modello braccio robotico in ADAMS con guanto (c).*

# CAPITOLO 3

## CASO STUDIO

Lo studio può essere suddiviso in 3 fasi ben distinte: sviluppo di traiettorie cinematiche con maniglia cilindrica, sviluppo di traiettorie cinematiche con guanto e modellizzazione della flangia meccanica.

Le prime due fasi, più simili tra loro rispetto alla terza fase, rappresentano lo sviluppo degli algoritmi, in Matlab, per la modellizzazione e l'esecuzione di specifiche traiettorie nello spazio con, rispettivamente, una maniglia cilindrica per la prima fase e un vero e proprio guanto per la seconda. In entrambe le fasi sono state svolte simulazioni delle traiettorie in Simulink-ADAMS, dove sono state ottenute le coppie sviluppate dai vari motori. Nella parte finale di questo studio è stata effettuata la modellizzazione in Solidedge di una flangia per il collegamento del braccio robotico al guanto.

### 3.1 Sviluppo di traiettorie cinematiche

La prima fase di questo studio si è incentrata sulla ricerca e sullo sviluppo di traiettorie cinematiche spaziali e planari. Queste traiettorie, sviluppate in Matlab, sono state pensate per la riabilitazione di pazienti con forza, nella mano e nel braccio, sufficiente ad afferrare la maniglia robotica per seguirne i movimenti. A tal fine, in base alle funzioni utilizzate (dipendenti da tempo, posizioni, velocità e accelerazioni iniziale e finale della maniglia robotica), è stato possibile suddividere i movimenti progettati in tre tipologie che differiscono tra loro per numero di punti nello spazio che la funzione deve attraversare. I tre movimenti sono:

- ad una sola via;
- andata e ritorno;
- a punti multipli.

I tre diversi movimenti sono stati sviluppati con algoritmi, alla base, simili tra loro, che però si differenziano per la presenza di diversi cicli “if-else” in base al numero di punti nei quali è stato imposto il passaggio. In particolare, i movimenti “ad una sola via” sfruttano un solo punto nel quale coincidono il punto iniziale e finale della traiettoria. I movimenti “andata e ritorno” sono costituiti da due punti che, nella fase, per l’appunto, di “andata” rappresentano i punti iniziale e finale, che poi vengono invertiti nella fase di “ritorno”. Infine, i movimenti a punti multipli rappresentano un’evoluzione dei movimenti di “andata e ritorno”, in quanto vengono selezionati una serie di punti nei quali, il punto finale è coincidente con il punto iniziale della traiettoria successiva finché il movimento non si conclude, in maniera ciclica, nel punto di partenza.

Oltre allo sviluppo delle traiettorie, è stato possibile ricavare i valori delle coppie sviluppate dai motori del braccio robotico. Questi valori di particolare importanza, in quanto ogni motore presenta un limite massimo di coppia erogabile. In particolare, i tre motori corrispondenti ai movimenti più grandi e ampi, posti alla base del cobot (Tq1, Tq2, Tq3) hanno un limite di 150 Nm, mentre i giunti più piccoli che servono al cobot per svolgere i movimenti più fini (Tq4, Tq5, Tq6) hanno un limite di 28 Nm. Attraverso questi valori è stato possibile valutare l’impiego di un cobot più grande e potente come l’UR10. Le coppie sono state denominate Tq (torque) e numerate, in base al giunto a loro associato, a partire dal giunto di base (Tq1) fino al giunto terminale (Tq6).

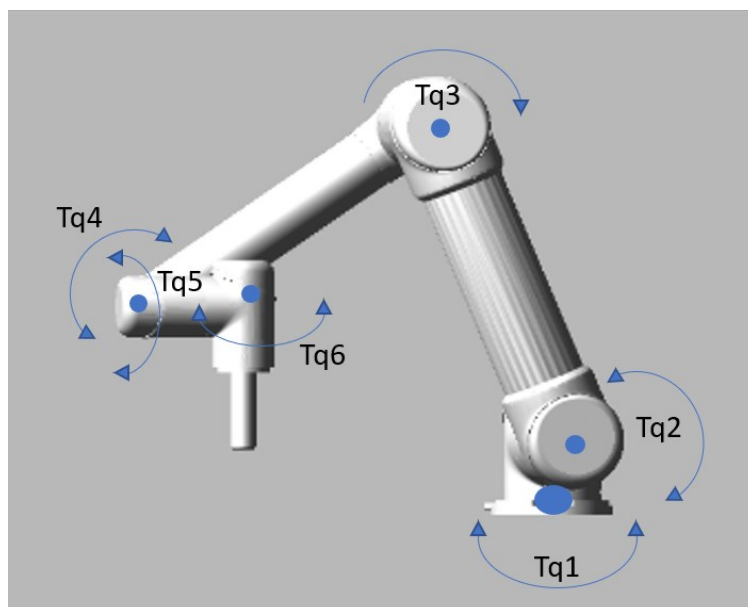
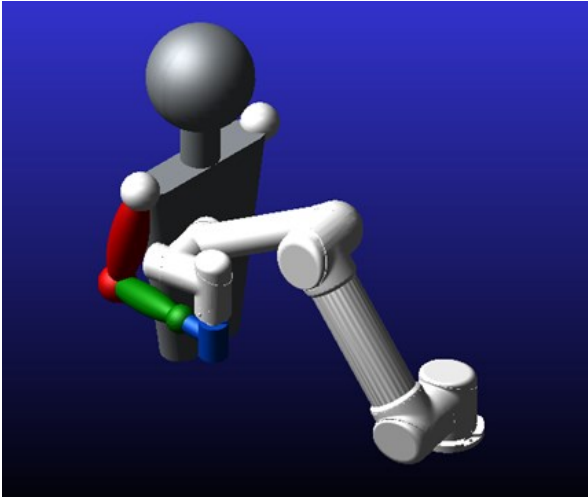


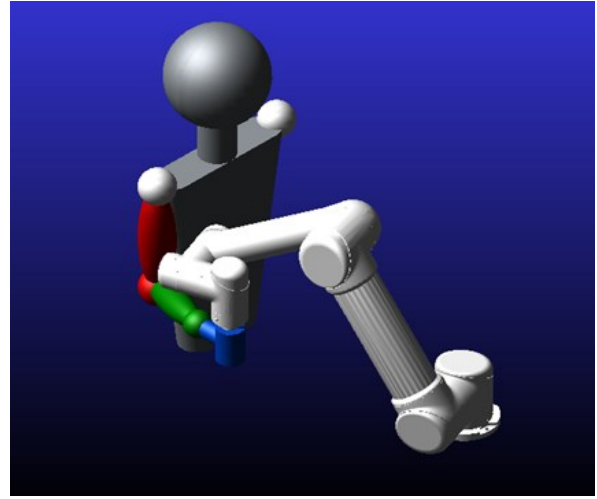
Figura 6: braccio robotico con rappresentazione della posizione e dei movimenti delle coppie cinematiche

### 3.1.1 Sviluppo traiettorie cinematiche con maniglia cilindrica

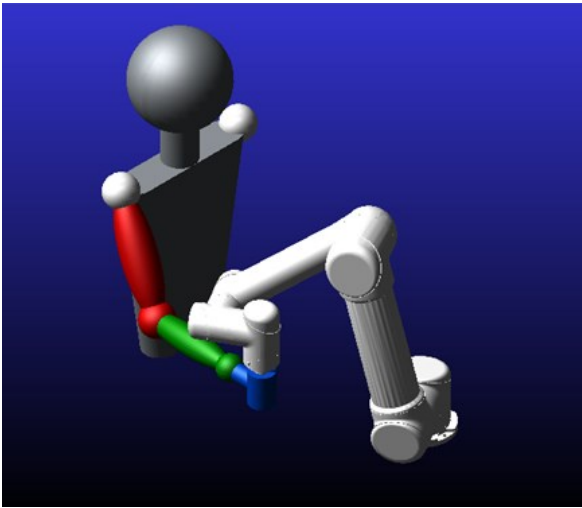
Per sviluppare le traiettorie, con la maniglia cilindrica, è stato necessario definire un parametro angolare "Q" attraverso una funzione parametrica dipendente dal tempo e dalle coordinate del punto di partenza e di arrivo. Tramite questo parametro è stato possibile sfruttare le funzioni angolari seno e coseno, che inserite in un sistema a tre equazioni, una per ogni piano di lavoro (frontale, sagittale, trasversale), hanno permesso lo sviluppo di diverse traiettorie spaziali. In particolare, le più rilevanti per l'ambito di interesse sono la traiettoria ellittica e la traiettoria di massima estensione. La traiettoria ellittica, giacente sul piano trasversale, fa parte delle traiettorie a una sola via e presenta ottime proprietà per i processi riabilitativi, in quanto, riproduce il movimento di leggera apertura e allungamento del braccio tipico per afferrare un oggetto posto frontalmente. Questa traiettoria parte con il braccio lungo il corpo e l'avambraccio flesso di 90°, in modo portare in avanti la mano, cosicché quest'ultima, seguendo la maniglia, possa compiere un movimento ellittico con gli assi maggiore e minore, rispettivamente, perpendicolare e parallelo al busto.



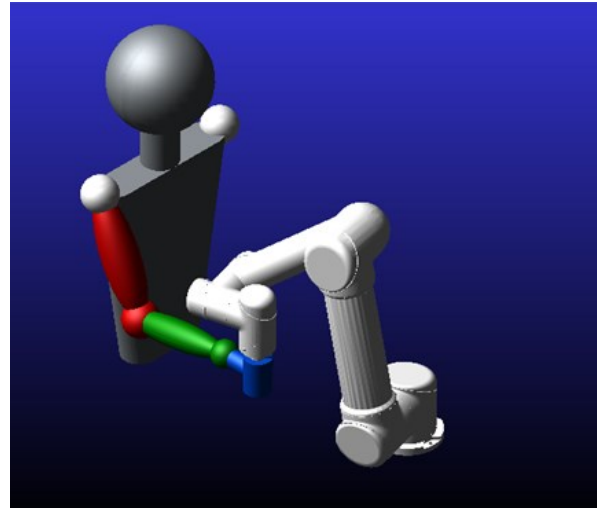
a



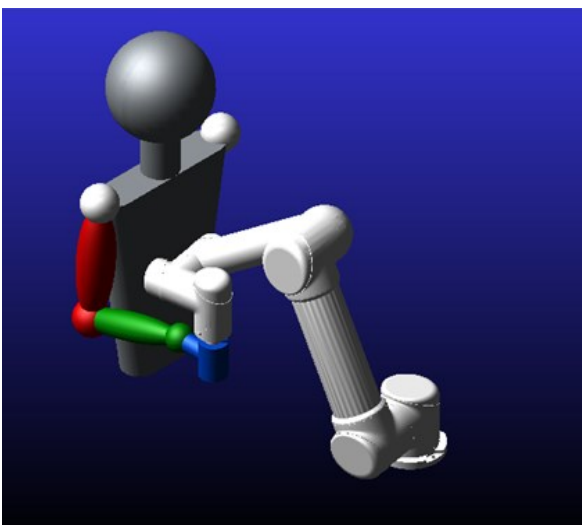
b



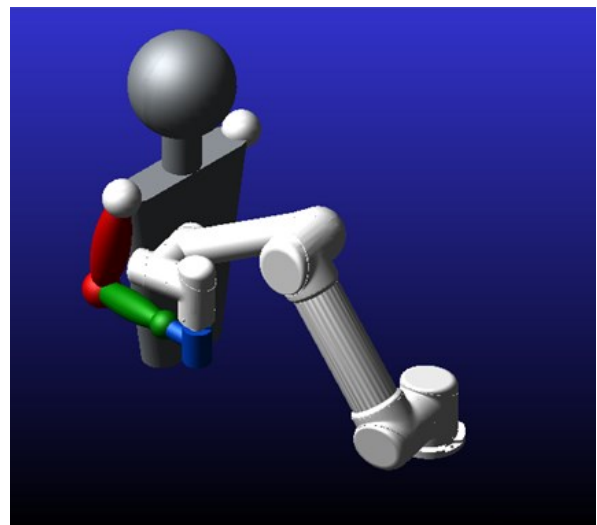
c



d



e



f

*Immagine 7a-f: evoluzione temporale della traiettoria elicoidale*

Il risultato di tale movimento porta ad avere dei momenti torcenti, sviluppati dai vari motori, con andamento quasi costante per tutto il periodo. In particolare, le coppie Tq6, Tq5, Tq4 e Tq1 presentano andamento quasi costante con intensità molto basse, mentre, Tq3 e Tq2 hanno valori più elevati, che raggiungono i 18 Nm e -40 Nm, entrambi con una diminuzione di intensità a metà della traiettoria, cioè dove il braccio umano ha la massima estensione, mentre quello robotico minima.

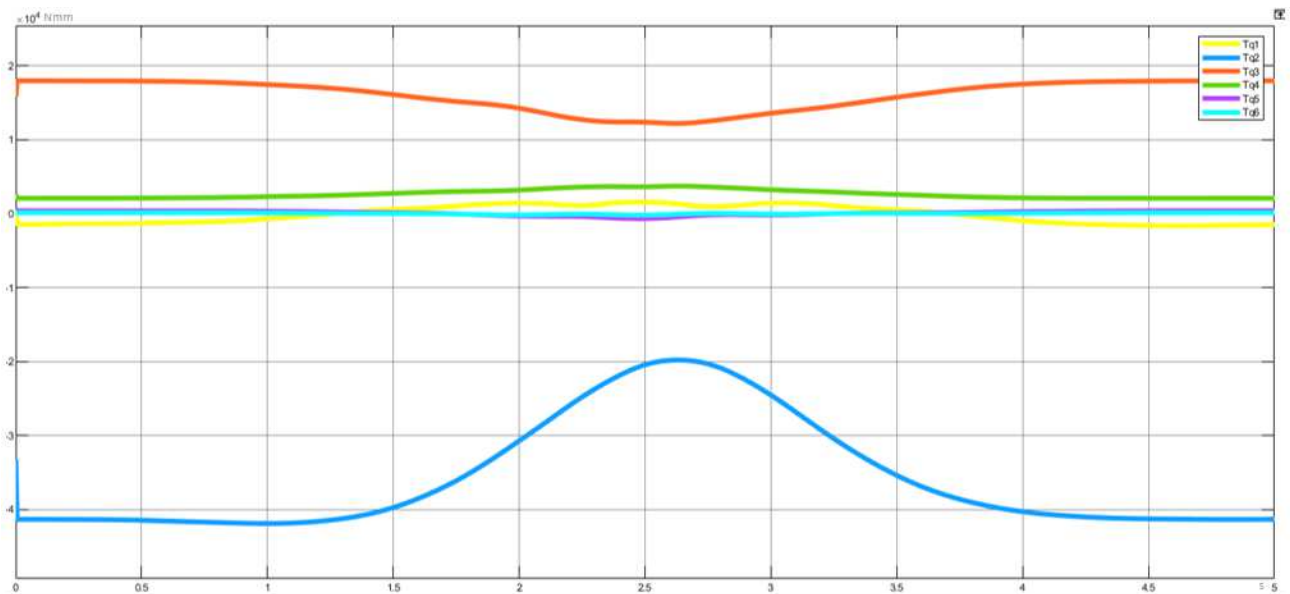
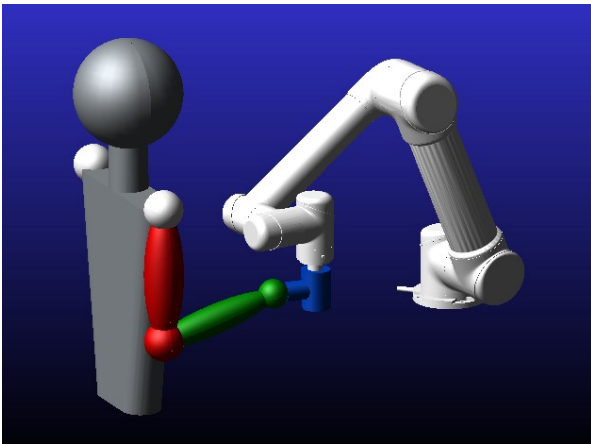
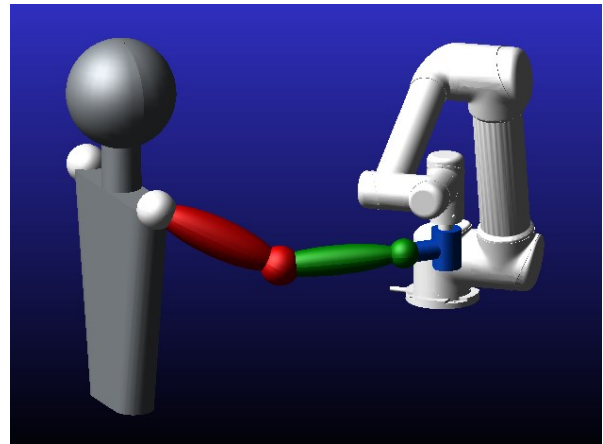


Immagine 8: andamento temporale delle coppie motrici nella traiettoria elicoidale

La traiettoria di massima estensione, di tipo andata e ritorno, trova, invece, la sua importanza nel fatto che il braccio viene fatto estendere fino al suo limite, imponendo così la massima estensione dei gruppi muscolari, oltre a permettere la valutazione delle prestazioni del cobot in condizioni limite. La posizione di partenza, in questo caso, è sempre quella di braccio lungo il corpo, avambraccio piegato di 90° e la mano in avanti ad afferrare la maniglia. A questo punto, la maniglia si sposterà lungo una retta che si allontana dal corpo in tutte e tre le direzioni in modo disomogeneo (in avanti, lateralmente, in alto), con il massimo allontanamento sempre perpendicolarmente al busto.



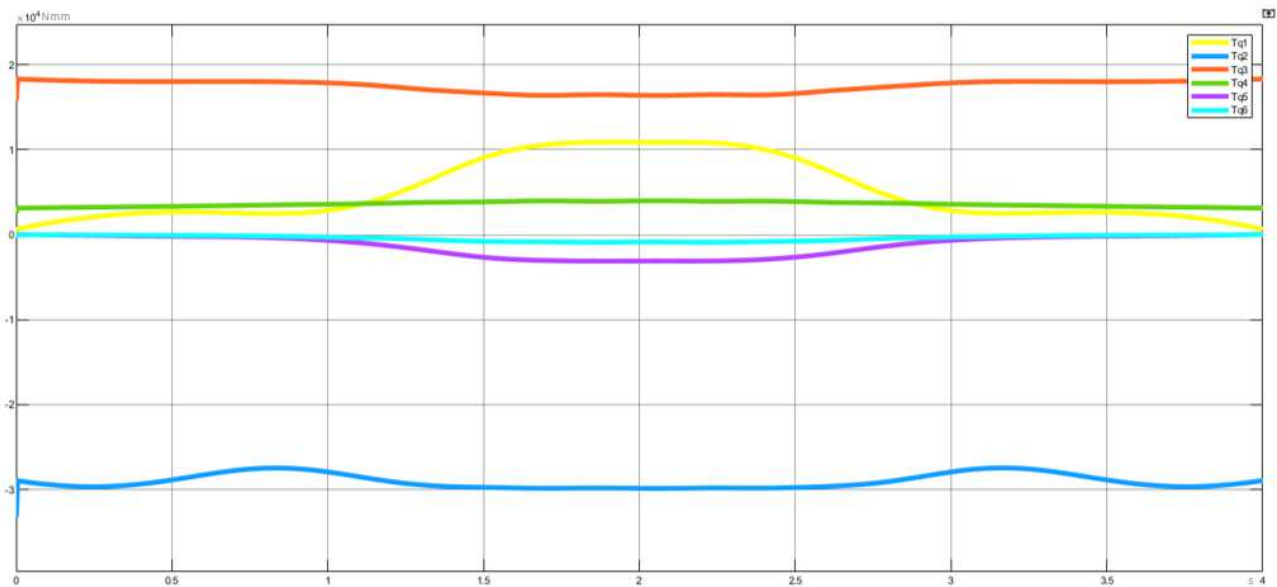
a



b

*Immagine 9a-b: punto iniziale e punto finale della traiettoria di massima estensione*

Nella traiettoria di massima estensione tutte le coppie hanno costantemente intensità inferiore ai 30 Nm. In particolare, le coppie Tq2 e Tq3 che sono quelle più sollecitate e raggiungono rispettivamente i -30 Nm e i 18 Nm, mentre le altre coppie hanno sempre intensità minori ai 12 Nm.

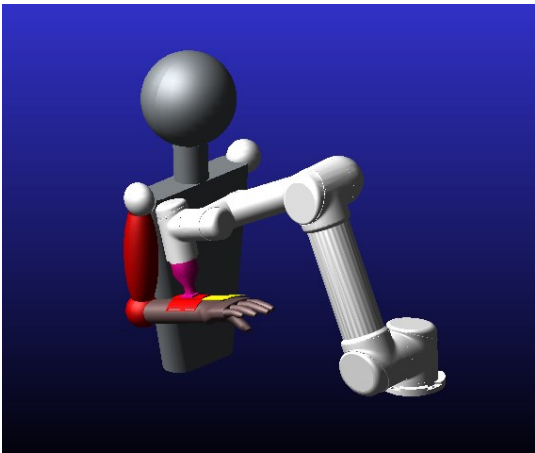


*Immagine 10: andamento temporale delle coppie motrici nella traiettoria di massima estensione*

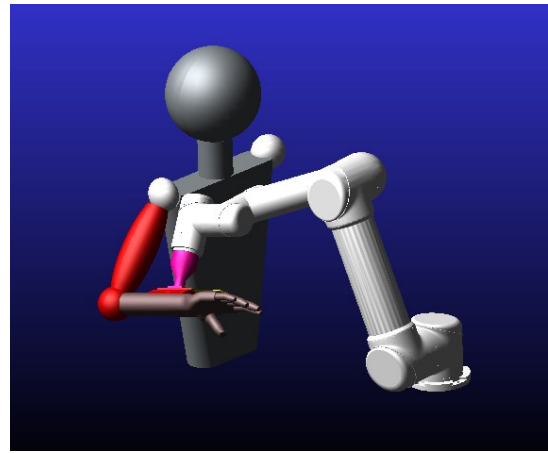
### 3.1.2 Sviluppo di traiettorie cinematiche con guanto di supporto

Le traiettorie cinematiche, sviluppate con questo tipo di end-effector, presentano gli stessi principi base di quelle con maniglia cilindrica, tuttavia il modello ADAMS-SIMULINK cambia, comportando un cambiamento nel codice matlab e di conseguenza anche nella metodologia di definizione delle traiettorie. Infatti, in questo caso, non è stato necessario definire un parametro dipendente dal tempo e dalle coordinate spaziali come in precedenza, ma si è lavorato sulle angolazioni relative delle articolazioni del braccio umano. In particolare, per ogni traiettoria sono state definite le angolazioni iniziali, finali e intermedie di tutti i 5 giunti articolari. In questo modo, specificando l'intervallo di tempo per passare da una configurazione angolare ad un'altra e con l'aggiunta di cicli "if-else" nel codice, è stato possibile sviluppare tutte e tre le tipologie di traiettoria. Come in precedenza, sono state sviluppate varie traiettorie, ma le più rilevanti per il nostro sono solo tre. La prima traiettoria è di tipo andata e ritorno, giace sul piano frontale e consiste in una traiettoria di abduzione della spalla. Nella posizione di partenza il paziente tiene il braccio lungo il corpo con l'avambraccio piegato in avanti di 90°. Il cobot alza il braccio lateralmente con una angolazione relativa, tra braccio e busto, fino a 90°.

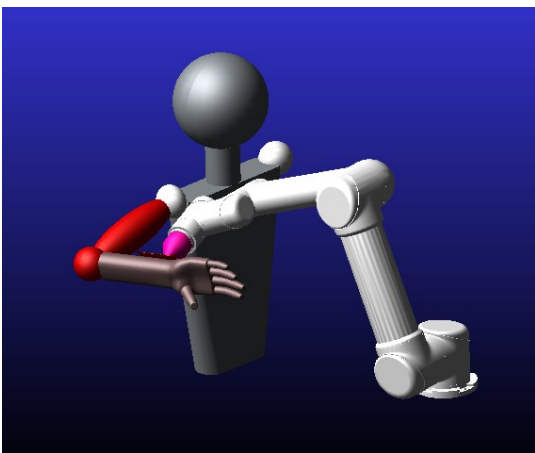




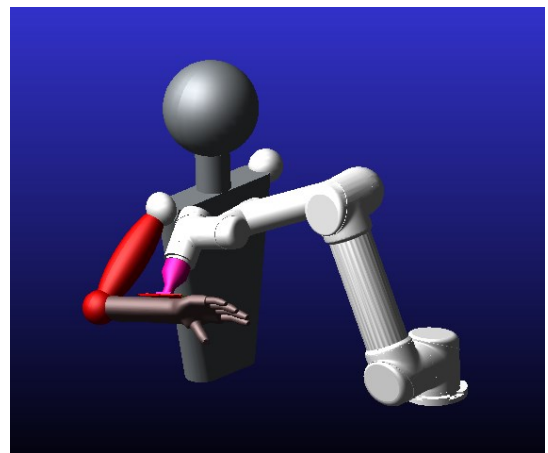
a



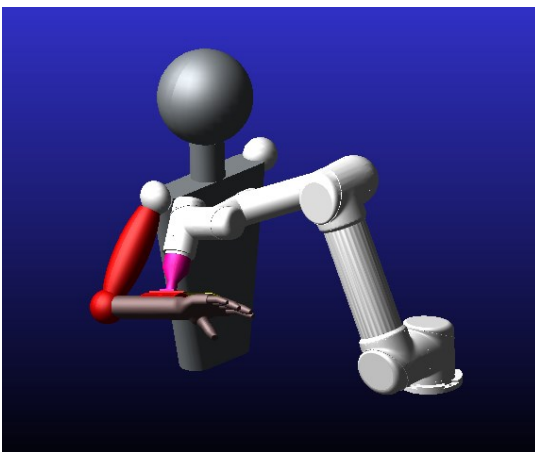
b



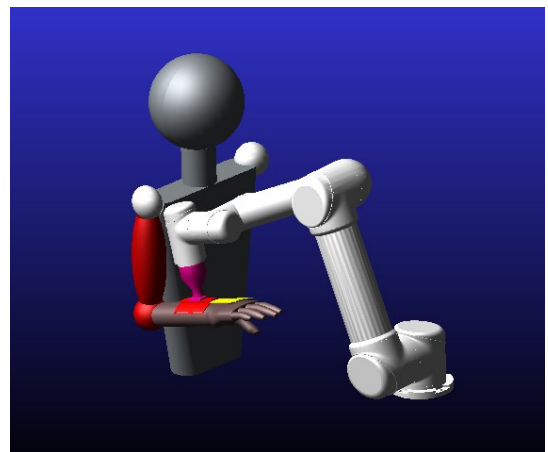
c



d



e



f

*Immagine 11a-f: evoluzione temporale della traiettoria di abduzione della spalla*

In questo caso, il momento torcente resta pressoché costante per tutte le coppie cinematiche inferiori ai 20 Nm, fatta eccezione per la coppia Tq1 che presenta un picco fino a 170 Nm.

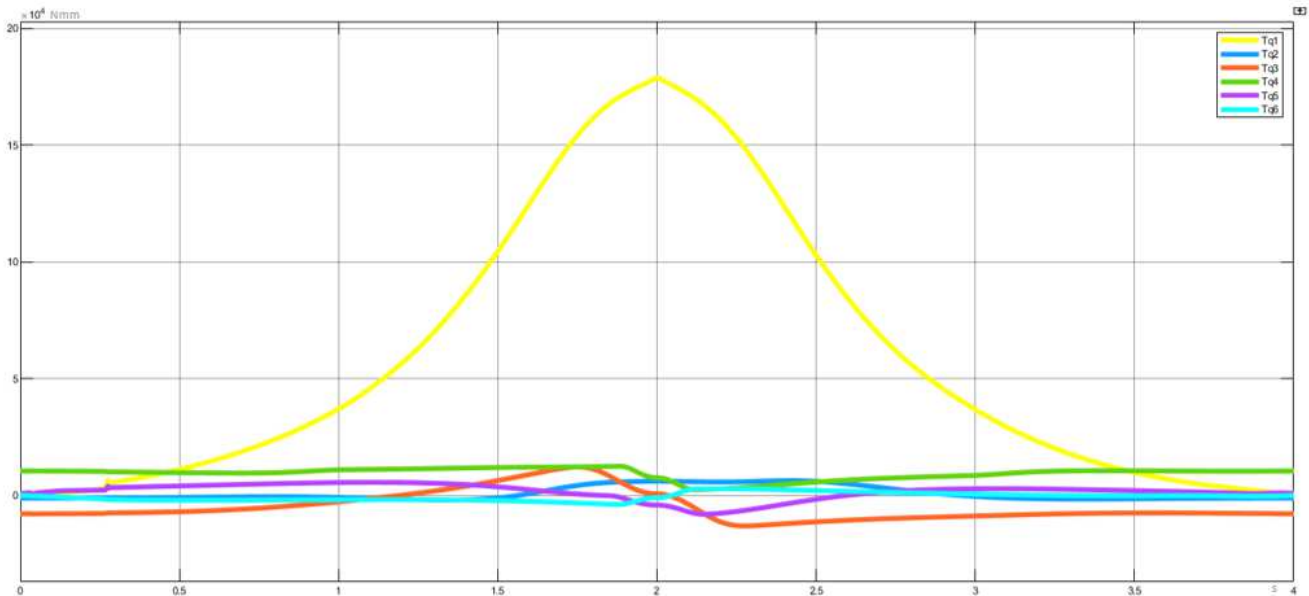
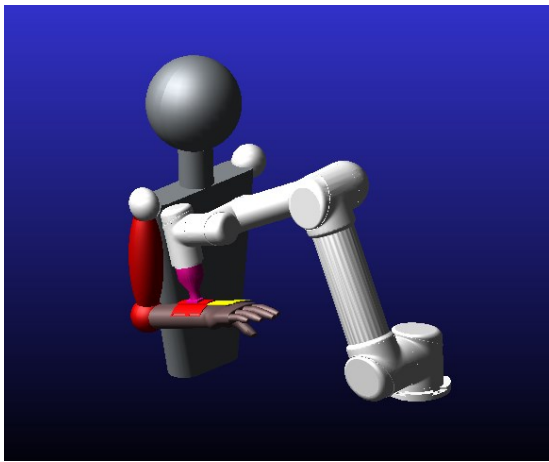
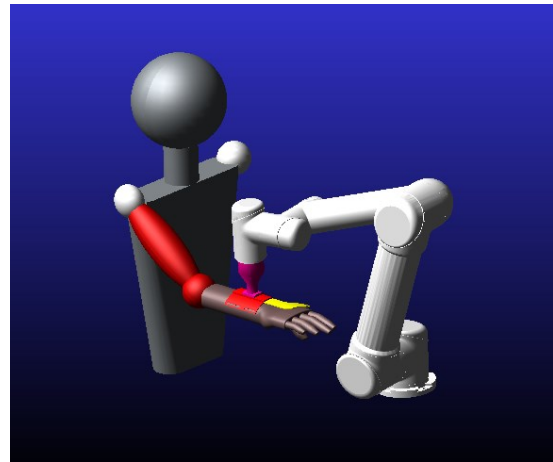


Figura 12: andamento temporale delle coppie motrici nella traiettoria di abduzione della spalla

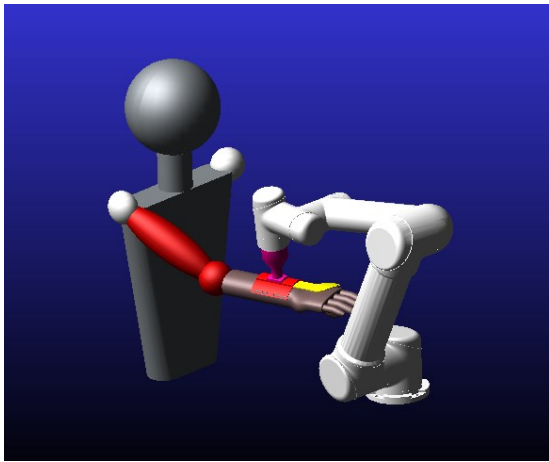
La seconda, chiamata “traiettoria 1”, è una traiettoria a 4 punti tridimensionale, che ripercorre, sul piano orizzontale, il perimetro di un trapezio e che effettua delle pause in corrispondenza dei vertici. La traiettoria risulta tridimensionale perché oltre al movimento sul piano orizzontale c’è una lieve variazione dell’altezza. La posizione di partenza è sempre con il braccio lungo il corpo e avambraccio piegato in avanti a formare un angolo di 90° con il resto del corpo. Il movimento procede con il cobot che fa estendere il braccio frontalmente e leggermente verso l’esterno, con un lieve sollevamento, poi il braccio esteso viene fatto traslare sul piano orizzontale. Da questa posizione il braccio viene richiamato al corpo, flettendo l’avambraccio e tornando all’altezza iniziale e come ultimo passaggio il braccio viene riportato nella posizione di partenza tramite una traslazione sul piano orizzontale.



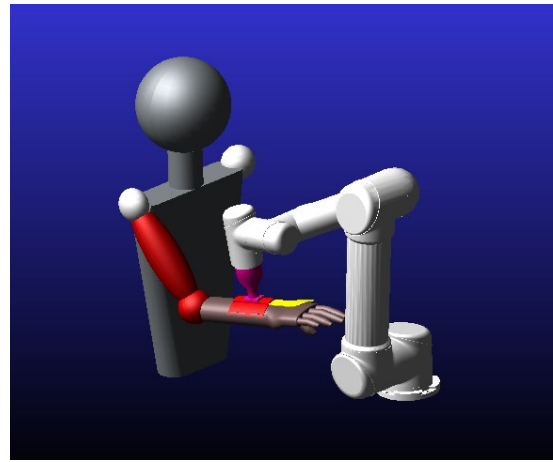
a



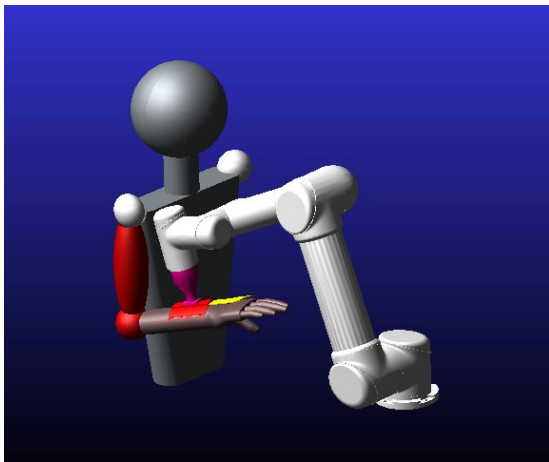
b



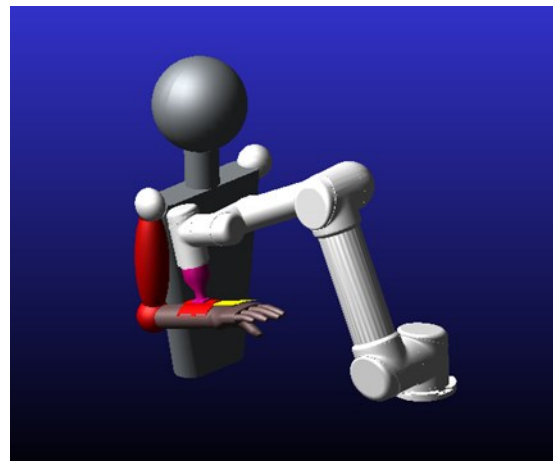
c



d



e



f

*Immagine 13a-f: evoluzione temporale della traiettoria 1*

In questo caso, le coppie sviluppate dai motori del cobot, hanno un andamento abbastanza variabile, soprattutto nell'intervallo tra i due e i quattro secondi, cioè la parte che presenta i movimenti più ampi. Le coppie  $T_{q4}$  e  $T_{q3}$ , le più sollecitate, nella fase centrale raggiungono rispettivamente 38 Nm e i -46 Nm, mentre, le altre hanno valori contenuti, che non superano mai i 20 Nm.

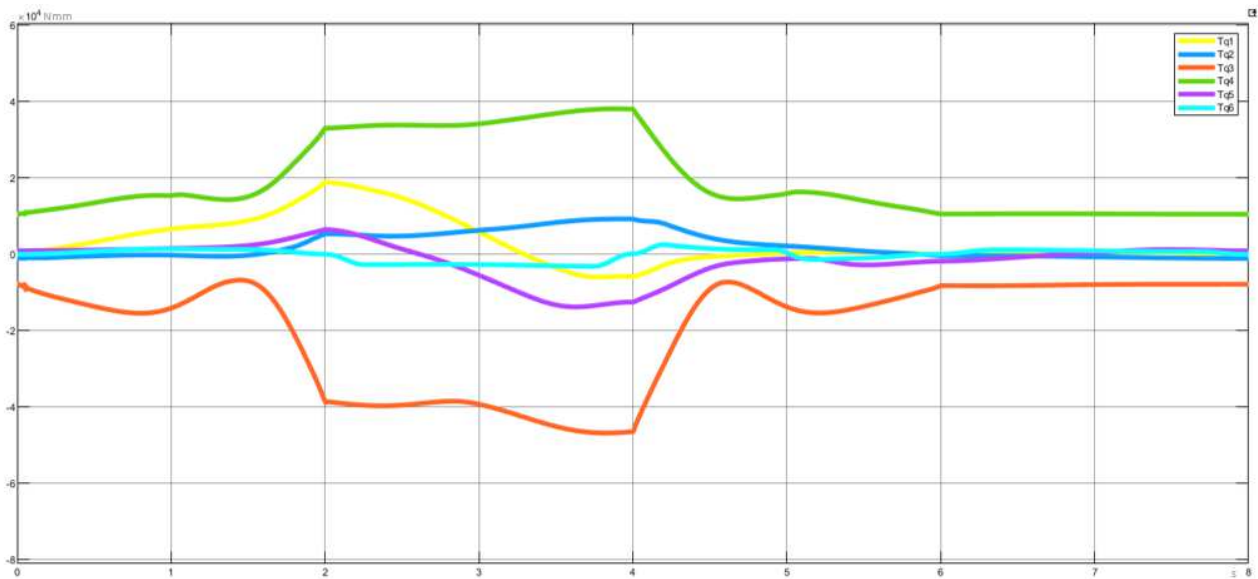
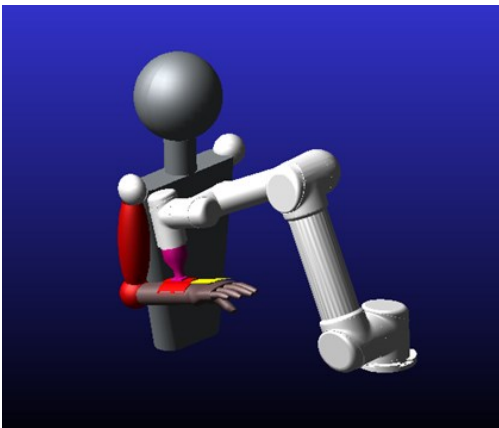
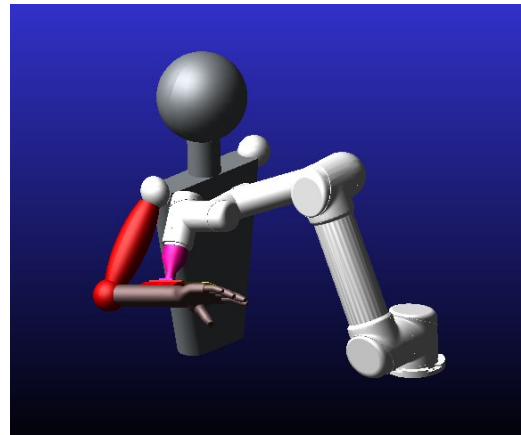


Immagine 14: andamento temporale delle coppie motrici nella traiettoria 1

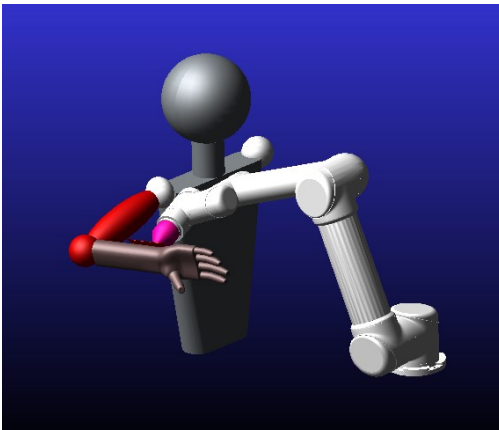
Inoltre, è stata sviluppata un'ulteriore traiettoria, detta "traiettoria 2", composta dalla combinazione delle due precedenti traiettorie. Il risultato è una traiettoria tridimensionale e a quattro punti, che comprende un movimento di abduzione della spalla seguito da altri tre movimenti, che invece, corrispondono ai movimenti della traiettoria 1. La posizione di partenza è la stessa dei casi precedenti, con il braccio lungo il corpo e un'angolazione braccio-avambraccio di 90°. Il braccio viene fatto ruotare verso l'esterno di 90° su un piano verticale mantenendo l'angolazione relativa tra braccio e avambraccio, poi il cobot porta in avanti il braccio, distendendolo e facendolo ruotare, in modo tale da avere il palmo della mano del paziente rivolto verso il basso. A questo punto il braccio viene fatto muovere su un piano orizzontale, fino a riallinearsi con il busto, e infine, come ultimo movimento, viene riportato alla posizione di partenza.



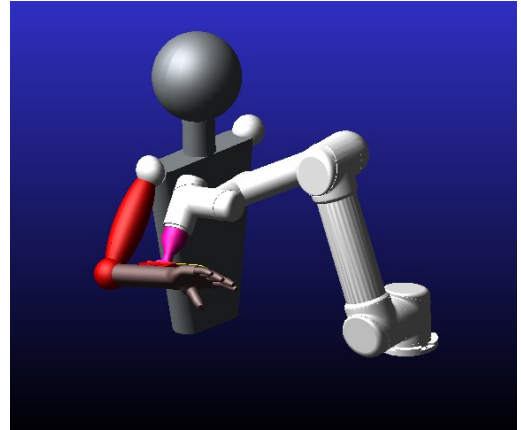
a



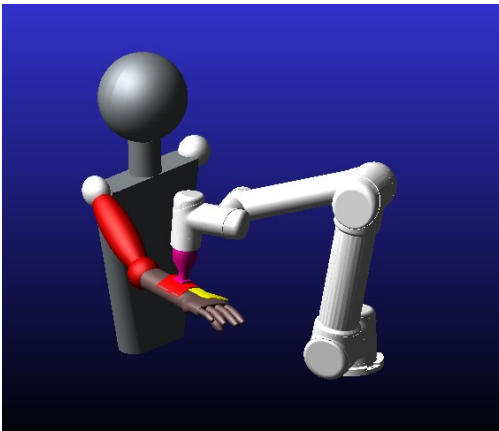
b



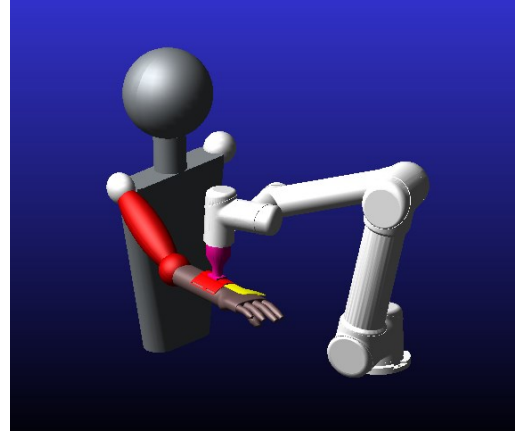
c



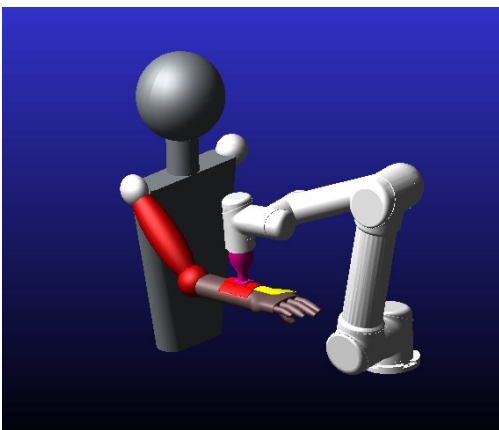
d



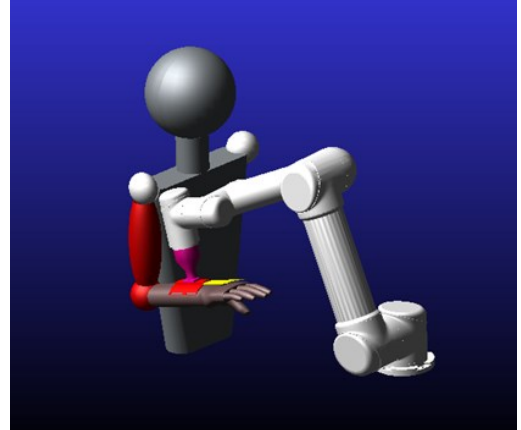
e



f



g



h

Immagine 15a-h: evoluzione temporale della traiettoria 2

La traiettoria 2, tra le traiettorie affrontate, è la più complessa. Infatti, i momenti torcenti presentano un andamento molto mutevole. Tuttavia, essendo l'unione della traiettoria di abduzione della spalla e della traiettoria 1 è possibile riconoscere valori analoghi, alle prove precedenti, in alcuni intervalli specifici di tempo. In particolare, nei primi due secondi, le coppie hanno un andamento molto simile, anche se con valori più contenuti per via della minor ampiezza del movimento, alla traiettoria di abduzione della spalla. Mentre, tra i quattro e i sei secondi, le coppie Tq4 e Tq3 hanno presentato le stesse intensità della traiettoria 1 nell'intervallo tra i due e i 4 secondi. Complessivamente, le coppie con i valori più elevati sono la Tq3 e la Tq1 che raggiungono i rispettivamente -50 Nm e i 50 Nm.

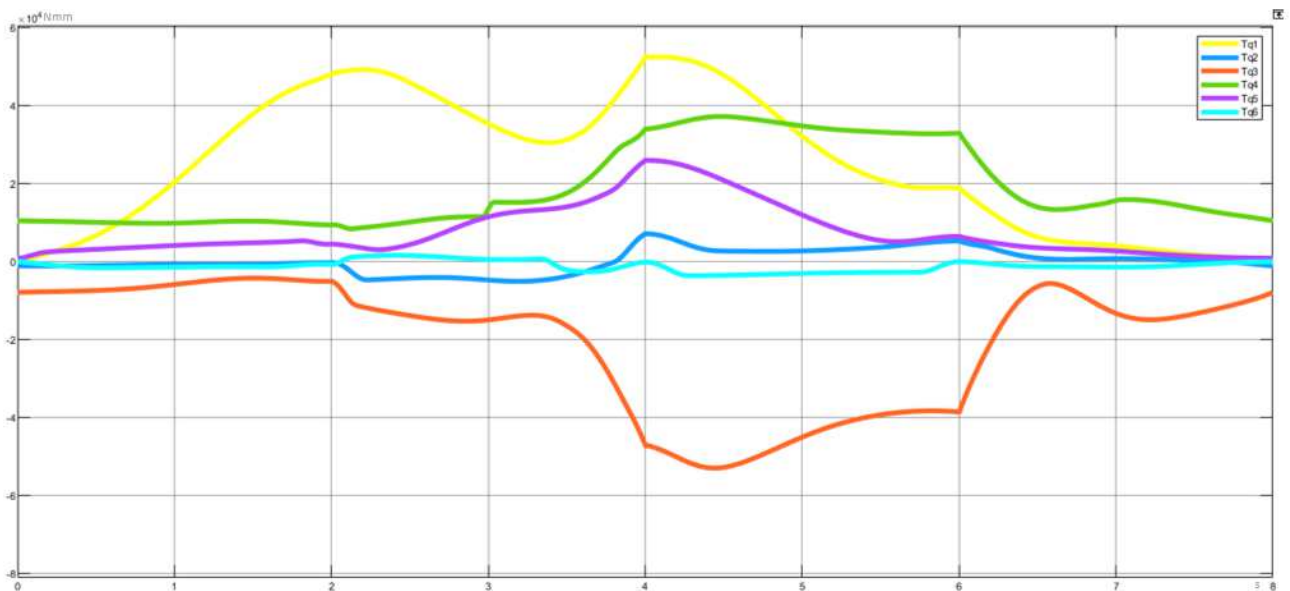
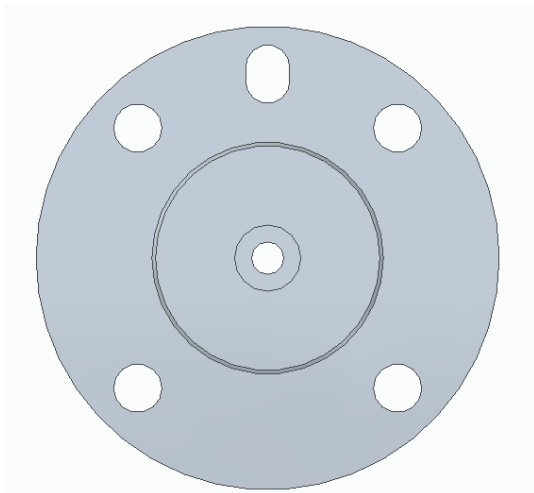


Immagine 16: andamento temporale delle coppie motrici nella traiettoria 2

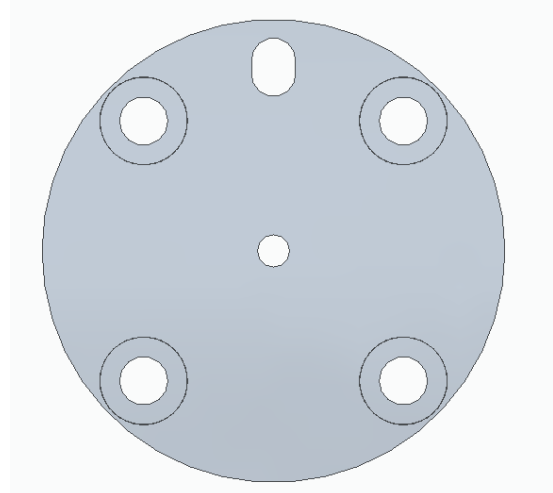
### 3.3 descrizione meccanica della flangia

La flangia di interconnessione tra robot e end-effector, completamente realizzata in Solidedge, è un dispositivo composto da un unico pezzo formato da 2 cilindri sovrapposti di diametro, rispettivamente, 63mm e 31mm, e altezza, 9mm e 6mm. Il cilindro a base larga presenta 5 fori, di cui 4 fori cilindrici e uno elicoidale. Il foro elicoidale serve al passaggio dei

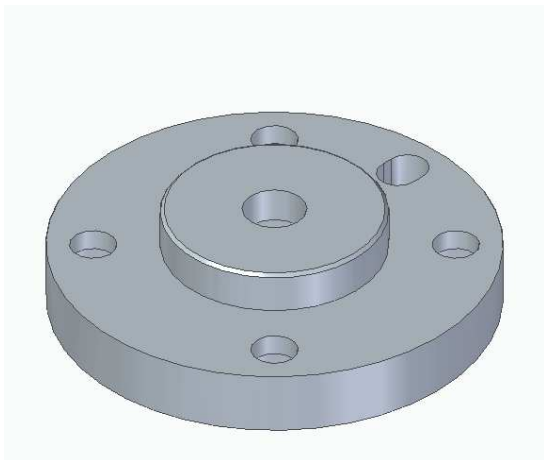
cavi e presenta un asse maggiore di 8mm e un asse minore di 6mm. I 4 fori cilindrici sono predisposti per l'aggancio con il braccio robotico e sono posti in modo equidistante tra di loro e dal centro della base cilindrica, con diametro che passa, ad una altezza di 6mm dalla base, da 12mm a 6.6mm. Il cilindro a base stretta presenta un unico foro centrale a base cilindrica con diametro che varia da 9mm a 4.4mm ad un'altezza di 5mm dalla superficie superiore. Infine, gli angoli del cilindro a base stretta sono stati smussati di 1mm con angolo di 45° e nessun foro presenta filettatura. Tuttavia, infine è stata realizzata una flangia con dimensioni leggermente differenti da quelle presentate, ma che presentassero le misure dei disegni quotati nell'immagine 18 a-d. Tale scelta è stata fatta in quanto le nuove misure presentano una miglior adattabilità con il robot.



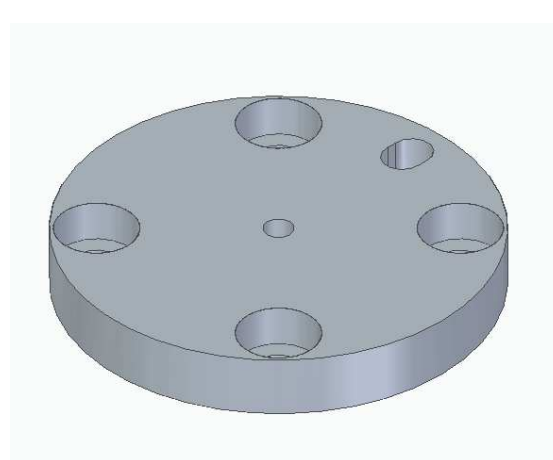
a



b



c



d





Immagine 17a-e: cinque visioni della flangia da diverse angolazioni; da sopra (a), da sotto (b), isometrica dall'alto (c), isometrica dal basso (d), laterale (e).

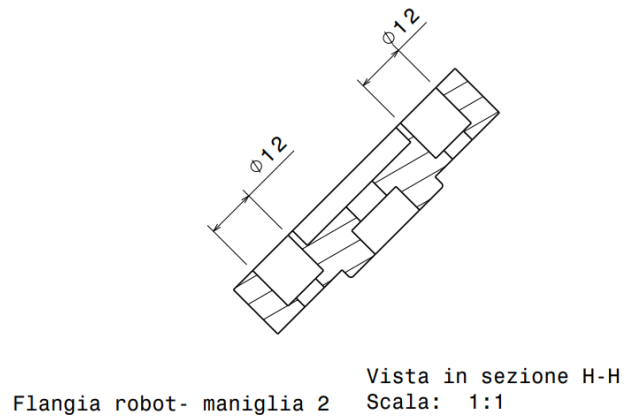
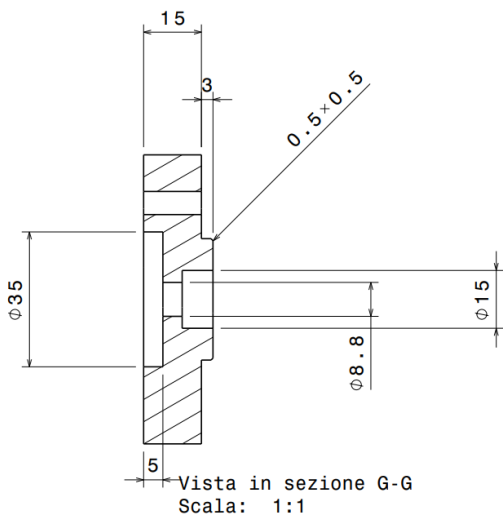
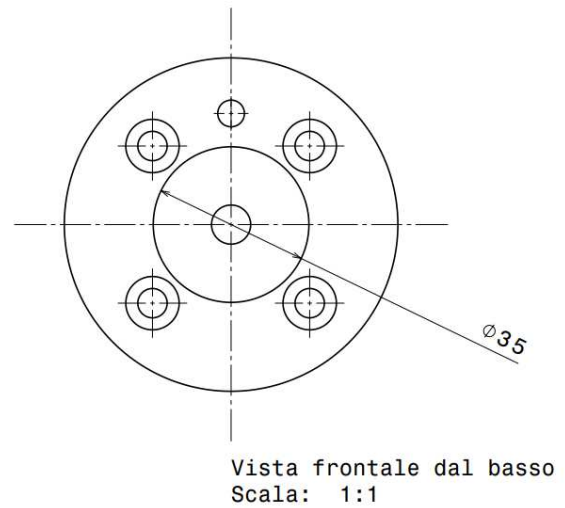
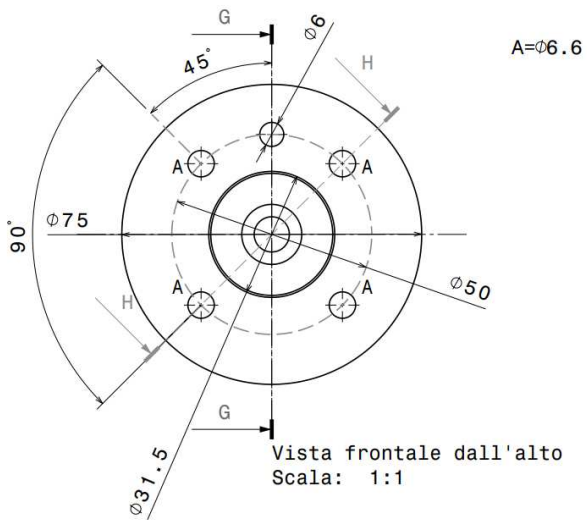


Immagine 18 a-d: schema costruttivo con misure espresse in mm da 4 angolazioni diverse: frontale dall'alto (a), frontale dal basso (b), vista laterale in sezione (c), vista laterale in sezione ruotata di  $45^\circ$  (d).



## CAPITOLO 4

### CONCLUSIONI

Lo scopo di questo studio era lo sviluppo di traiettorie uomo-robot, al fine di poter utilizzare in futuro tali traiettorie per processi riabilitativi. Le traiettorie sono state sviluppate con due tipologie differenti di maniglie in modo tale da affrontare una casistica più ampia. Inoltre, nello studio, è stata compresa una parte di realizzazione, in Solidedge, di un dispositivo meccanico che fungesse da collegamento tra la parte conclusiva del braccio robotico e il guanto di supporto come end-effector.

Lo studio si è concluso completando lo sviluppo di varie traiettorie che risultassero adeguate alla riabilitazione neuromuscolare del braccio, sia con la maniglia cilindrica sia con il guanto di supporto. In particolare, la traiettoria ellittica e di massima estensione, con la maniglia cilindrica, le traiettorie di abduzione della spalla e a quattro punti con il guanto di supporto. L'analisi delle coppie, tuttavia, ha evidenziato come non sia possibile, per un cobot quale l'UR5, sviluppare tutte queste traiettorie. In particolare, le traiettorie di con la maniglia cilindrica e la traiettoria 1 presentano valori adeguati per l'UR5, mentre, le coppie sviluppate dalla traiettoria 2 e dalla traiettoria di abduzione della spalla presentano valori troppo elevati, per essere completate dall'UR5. Tuttavia, tali traiettorie potrebbero essere sviluppate utilizzando un cobot più potente come l'UR10, che potrebbe essere indicato anche per le traiettorie precedenti, in modo tale da poter operare con margini più ampi rispetto ai limiti massimi del cobot.

Un ulteriore studio, particolarmente interessante, che potrebbe essere svolto in futuro è lo sviluppo e l'analisi di traiettorie cinematiche con un braccio robotico che abbia la base posta su un piano verticale o su di un piano orizzontale posto al di sopra del paziente. Tale studio sarebbe di particolare importanza per testare e validare l'eventuale possibilità di predisporre degli ambienti dove si possano collegare i cobot alle pareti o al soffitto. Inoltre, sarebbe possibile studiare e sviluppare dei sistemi interattivi, che su interfacce visive, come televisori o tablet, indichino al paziente i movimenti da effettuare, come in un videogioco. Tale modalità permetterebbe di ottimizzare le fasi di riabilitazione rendendo anche il

paziente più autonomo, ma comunque controllato. Inoltre, potrebbe migliorare l'aspetto psicologico dei trattamenti rendendoli più piacevoli e coinvolgenti per il paziente.

## Bibliografia e Sitografia

- 1- E D Oña, et al. A Review of Robotics in Neurorehabilitation: Towards an Automated Process for Upper Limb. Hindawi, Journal Healthcare Engineering Vol 2018.
- 2- G Chiriatti. Kinematic models for human robot collaboration. Università Politecnica Delle Marche, 2019.
- 3- E Kyrkjebø, et al. Feasibility of the UR5 Industrial Robot for Robotic Rehabilitation of the Upper Limbs After Stroke. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 1-5, 2018.
- 4- J Nielsen, et al. Individualised and adaptive upper limb rehabilitation with industrial robot using dynamic movement primitives. The Mærsk Mc-Kinney Møller Institute University of Southern Denmark, University of Gottingen.
- 5- P S Lum, et al. Robot-Assisted Movement Training Compared with Conventional Therapy Techniques for the Rehabilitation of Upper-Limb Motor Function After Stroke. Arch Phys Med Rehabil Vol 83, July 2002.