

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA
BIOMEDICA

TITOLO DELLA TESI

STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE QUANTITATIVA DELLA
EFFICACIA DI UN DISPOSITIVO DI RIABILITAZIONE ROBOTICA.
SVILUPPO E VALIDAZIONE.

Tesi in:

BIOINGEGNERIA DELLA RIABILITAZIONE BS

Relatore:
Prof. Ing. Rita Stagni

Presentata da:
Antonio Mancini

Sessione: **III**

Anno Accademico: 2010-2011

INDICE

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1 | Background e contesto clinico | 1 |
| 1.2 | La riabilitazione robotica per arto superiore | 2 |
| 1.3 | Razionale e obiettivo della tesi | 3 |
| 2 | MATERIALI E METODI | 5 |
| 2.1 | Raccolta dati | 5 |
| 2.1.1 | Il dispositivo robotico: <i>Hocoma Armeo®Spring</i> | 5 |
| 2.1.2 | Le valutazioni cliniche | 8 |
| 2.2 | Indici biomeccanici di performance | 9 |
| 2.2.1 | Indici di R.O.M. (<i>Range Of Motion</i>) | 12 |
| 2.2.2 | Indici di smoothness | 14 |
| 2.2.3 | Indici di pressione della mano | 19 |
| 2.3 | Scelta e caratteristiche dei soggetti inclusi nello studio | 20 |
| 2.4 | Analisi statistica | 21 |
| 3 | RISULTATI | 25 |
| 3.1 | Indici di R.O.M. | 26 |
| 3.1.1 | Coordinate X, Y, Z [end-point] | 26 |
| 3.1.2 | Range articolari | 26 |
| 3.2 | Indici di smoothness | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1 | Descrittori di velocità | 29 |
| 3.2.2 | Descrittori di sovraelongazione | 32 |
| 3.2.3 | Misura del jerk adimensionalizzato | 33 |
| 3.3 | Indici di pressione sull' end-point | 33 |
| 4 | CONCLUSIONI | 35 |
| 4.1 | Interpretazione dei risultati | 35 |
| 4.1.1 | Indici di R.O.M. | 35 |
| 4.1.2 | Indici di smoothness | 36 |
| 4.1.3 | Indici di pressione sull' end-point | 37 |
| 4.2 | Conclusioni | 37 |
| | BIBLIOGRAFIA | 39 |

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Background e contesto clinico

La riabilitazione successiva alla maggior parte dei traumi di natura neurologica consiste largamente nello svolgimento di attività correlate alle azioni della vita quotidiana, o volte al raggiungimento di un obiettivo (*goal-directed training*), in cui al paziente è richiesto di compiere dei movimenti ripetuti per produrre dei pattern motori funzionali.

L'obiettivo dell'intervento riabilitativo è quello di raggiungere il miglior livello di autonomia del paziente nelle fasi acute e sub-acute (fino ad 1 anno circa dall'evento), e di mantenere e consolidare i risultati raggiunti dalla fisioterapia nel periodo successivo.

In seguito ad una lesione del sistema nervoso centrale si viene a perdere parte dell'autonomia e della capacità di svolgere in maniera indipendente le attività della vita quotidiana; il danno neurologico, di solito conseguente ad eventi ischemici o emorragici, determina una necrosi cellulare che è proprio la causa del deficit neuro-motorio.

Nelle settimane, nei mesi e negli anni successivi all'evento acuto le porzioni di sostanza grigia intorno all'area cerebrale danneggiata si riorganizzano al fine di compensare le funzioni perdute.

In ambito clinico il fenomeno è conosciuto come *neuroplasticità* o *plasticità cerebrale* (che è alla base del conseguente *riapprendimento motorio*). Questo comportamento può essere stimolato, potenziato e guidato tramite un percorso di riabilitazione, con l'obiettivo di diminuire gli effetti della lesione cerebrale, quindi il grado di disabilità, e rafforzare al meglio le funzioni residue.

Il meccanismo del riapprendimento motorio è strettamente legato a diversi fattori:

- ripetizione attiva di task motori volti a stimolare le funzionalità residue dell' arto
- feedback sensoriale (residuo o amplificato attivamente)
- coinvolgimento e motivazione psicologica

Inoltre è dimostrato dall' evidenza clinica che questo processo risulta più veloce se il training è variabile ed *error-driven*.

Da questo punto di vista l' approccio riabilitativo robotico consente numerosi vantaggi: ripetibilità del gesto, maggiore autonomia durante l' esecuzione dei task, possibilità di studiare e validare nuovi protocolli basati su differenti leggi di moto o pattern motori, introduzione di diverse strategie da adottare per garantire un recupero più efficace.

Si sottolinea che, al fine di massimizzare l' effetto terapeutico, l'assistenza robotica deve essere sufficiente da permettere al soggetto di completare il task ma anche tale per cui il soggetto contribuisca il più possibile alla formazione del movimento.

1.2 La riabilitazione robotica per arto superiore

Il training robotico può essere incentrato sulla parte prossimale o su quella distale dell' arto paretico. I due trattamenti non vengono utilizzati sempre separatamente; in studi più recenti infatti si possono incontrare programmi terapeutici in cui le due modalità riabilitative sono utilizzate in sequenza o in coordinazione. Inoltre, si possono distinguere due approcci riabilitativi fondamentali: *end-effector based*, in cui il paziente impugna la parte terminale del robot, che lo assiste nel movimento, e tramite *esoscheletro*.

Il dispositivo su cui è stato costruito il progetto di tesi appartiene alla seconda categoria, ed è infatti un esoscheletro passivo: in questo caso la cinematica del robot risulta "corrispondente" a quella del paziente dato che l' esoscheletro segue solidalmente il movimento che il soggetto esegue. Il movimento del paziente risulta quindi più controllabile ma al tempo stesso la riproduzione dei gradi di libertà associati alle articolazioni assume una rilevante complessità.

L' interesse verso la riabilitazione robotica è cresciuto a dismisura negli ultimi 20 anni [1],

in particolare come mezzi per complementare l' azione del fisioterapista, assistendolo nella ripetizione meccanica di movimenti funzionali dell' arto del paziente. La riabilitazione attraverso robot consente di eseguire movimenti precisi e ripetibili, e permette (a parità di tempo) di aumentare il numero di ripetizioni eseguite e conseguentemente il carico di lavoro della seduta. Per di più, l' assistenza fornita al paziente dallo strumento “svincola” in qualche maniera il terapeuta consentendogli di concentrarsi su altri aspetti, più critici, della riabilitazione o addirittura di amministrare simultaneamente il trattamento su più di un individuo.

La combinazione di un robot riabilitativo con esercizi svolti in ambiente virtuale appare inoltre potenzialmente benefica in termini di coinvolgimento e partecipazione da parte del paziente che, come è stato detto, sono fattori fondamentali per il recupero delle capacità motorie e funzionali dell' arto.

Alcuni esempi di dispositivi robotici per la terapia dell' arto superiore includono il MIT-Manus [2, 3], l' ARM Guide [4], MIME [5], GENTLE/s [6], Bi-Manu-Track [7], T-Wrex [8, 9], ARMin [10, 11], ReJoyce [13], ReoGo [14].

1.3 Razionale e obiettivo della tesi

Un ulteriore beneficio dei dispositivi per riabilitazione robotica è la capacità che offrono di registrare informazioni di natura cinematica circa i movimenti dell' utente, in tempo reale durante l' esecuzione di un task motorio.

La possibilità di convertire queste misure in parametri informativi di rilevanza clinica porterebbe ad una serie di vantaggi: in primo luogo, la valutazione quantitativa frequente delle performance del paziente consentirebbe un monitoraggio molto più accurato del processo di recupero delle capacità motorie nel corso della terapia; questo avrebbe un effetto diretto sulla pianificazione del trattamento e sulle modifiche introdotte sessione-per-sessione sulla base dei risultati ottenuti durante le sedute riabilitative.

Inoltre, l' utilizzo di descrittori quantitativi estrapolati dal robot ridurrebbe la soggettività intrinsecamente associata agli strumenti valutativi tipicamente impiegati in terapia riabilitativa (test clinici funzionali) [14].

Capitolo 1: Introduzione

Un significativo numero di studi si concentra sull'analisi della correlazione tra gli indici del movimento ottenibili da un dispositivo robotico (che includono smoothness, accuratezza, velocità, forza prodotta) con le misure cliniche utilizzate su pazienti neurologici, come il Fugl-Meyer Test [15-19], il Motor Power Score [14, 17], il Motor Status Score [17, 18], l'Action Research Arm Test [19], con risultati positivi e promettenti [15, 17, 19].

Come in alcuni di questi studi, il presente lavoro si pone l'obiettivo di indagare le evidenze di una correlazione tra i parametri biomeccanici ottenuti con il dispositivo Armeo®Spring e le valutazioni funzionali ottenute con il punteggio della scala clinica *Wolf Motor Function Test*.

L'ipotesi alla base dello studio è che utili informazioni diagnostiche possano essere derivate dai dati registrati dal robot durante l'utilizzo terapeutico, senza la necessità di ulteriori procedure valutative dedicate.

Lo scopo è quello di stimare la capacità dei descrittori biomeccanici implementati di essere rappresentativi dello stato clinico dei pazienti sottoposti al trattamento robotico.

Il progetto di tesi, che viene esposto con il presente elaborato, rappresenta uno studio retrospettivo su dati di soggetti in cura presso il reparto di riabilitazione neuro-motoria dell'ospedale Sol Et Salus di Torre Pedrera (Rimini). L'indagine costituisce uno studio sperimentale su uno degli strumenti disponibili all'interno del reparto di terapia occupazionale dell'ospedale, ovvero l'esoscheletro passivo *Hocoma Armeo®Spring*.

La tesi è strutturata in 4 capitoli: nel primo vengono presentati background e contesto clinico, e vengono esplicitati razionale e scopo della tesi; il secondo capitolo presenta i materiali e metodi utilizzati, mentre nel terzo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti nel corso dello studio. L'ultimo capitolo contiene infine le conclusioni emergenti dal lavoro sviluppato, e gli spunti per un eventuale approfondimento successivo dell'indagine.

CAPITOLO 2

MATERIALI E METODI

Il lavoro svolto rappresenta uno studio retrospettivo su pazienti assegnati ad un programma di riabilitazione motoria dell' arto superiore in seguito ad eventi traumatici di natura cardio-vascolare o spinale; il quadro clinico dei soggetti indagati è caratterizzato da un grado di emi-/ tetraplegia più o meno elevato.

L' approccio seguito è riassumibile nelle seguenti fasi:

- Studio del dispositivo per identificarne modalità di funzionamento e tipologia di informazioni fornite.
- Individuazione e derivazione di parametri biomeccanici per la valutazione della performance di arto superiore durante il trattamento.
- Identificazione dei soggetti adatti ad essere inseriti nello studio.
- Sviluppo di una osservazione statistica dei risultati allo scopo di mettere in luce eventuali correlazioni tra i descrittori quantitativi estrapolati e le scale cliniche utilizzate dal personale medico.

I dettagli di ognuno di questi passi vengono approfonditi nei paragrafi che seguono.

2.1 Raccolta dati

2.1.1 Il dispositivo robotico: *Hocoma Armeo®Spring*

Il dispositivo robotico utilizzato durante la terapia riabilitativa è il sistema meccanico *Armeo®Spring* (<http://www.hocoma.com/en/products/armeo/armeo-spring/>), che rappresenta la replica commerciale del dispositivo T-WREX [20], fornita dall' azienda *Hocoma*.

L' *Armeo®Spring*, essendo sprovvisto di attuatori, consiste in un esoscheletro passivo

avente 6 gradi di libertà (2 per la spalla, 2 per il gomito, 2 per il polso), in cui l'arto del soggetto può essere alloggiato ed adattato permettendo una compensazione variabile del peso di braccio e avambraccio, grazie ad un sistema di molle regolabile.

Questo consente ad i pazienti, attraverso l' utilizzo delle proprie funzionalità residue, di raggiungere un' estensione attiva dei movimenti nello spazio 3-D più ampia di quella che si avrebbe in assenza di supporto [21]. In figura 1 è mostrato un utilizzo del dispositivo robotico.



FIG.1 – Lo svolgimento di un esercizio con il robot riabilitativo Armeo®Spring.

Nelle sessioni terapeutiche svolte presso la clinica Sol Et Salus, il grado di compensazione dell' arto è stato deciso in funzione dello stato clinico del soggetto e dell' obiettivo della seduta; quando possibile, si è fatto in modo che l' arto – lasciato passivo – permanesse in una posizione neutrale sullo strumento, con il braccio a 45° gradi rispetto al busto e l' avambraccio parallelo al suolo.

Nella versione dell' Armeo®Spring utilizzata (1_21-1005) l' esoscheletro include 8 giunti (vincoli cilindrici per la rotazione intorno ad un singolo asse), che consentono il movimento della struttura nello spazio tridimensionale in maniera bilaterale: i giunti 1 e 2 permettono il movimento dell' articolazione di spalla nel piano orizzontale ed il giunto 3 in quello verticale; analogamente i giunti 4 e 5 regolano il movimento dell' avambraccio nel piano orizzontale ed il giunto 6 quello nel piano verticale. I giunti rimanenti, 7 e 8, sono associati rispettivamente alla prono-supinazione e flessione-estensione del polso. L' end-point consiste a

sua volta di un sensore di pressione per la presa della mano, che può essere utilizzato nel corso degli esercizi per compiere gesti di *grasp-and-release*.

Nelle figure 2 e 3 sono mostrate le posizioni dei giunti meccanici sull' esoscheletro e la posizione di riferimento del sistema, che rappresenta l' origine del sistema di coordinate per tutte le variabili fornite in output dal dispositivo.

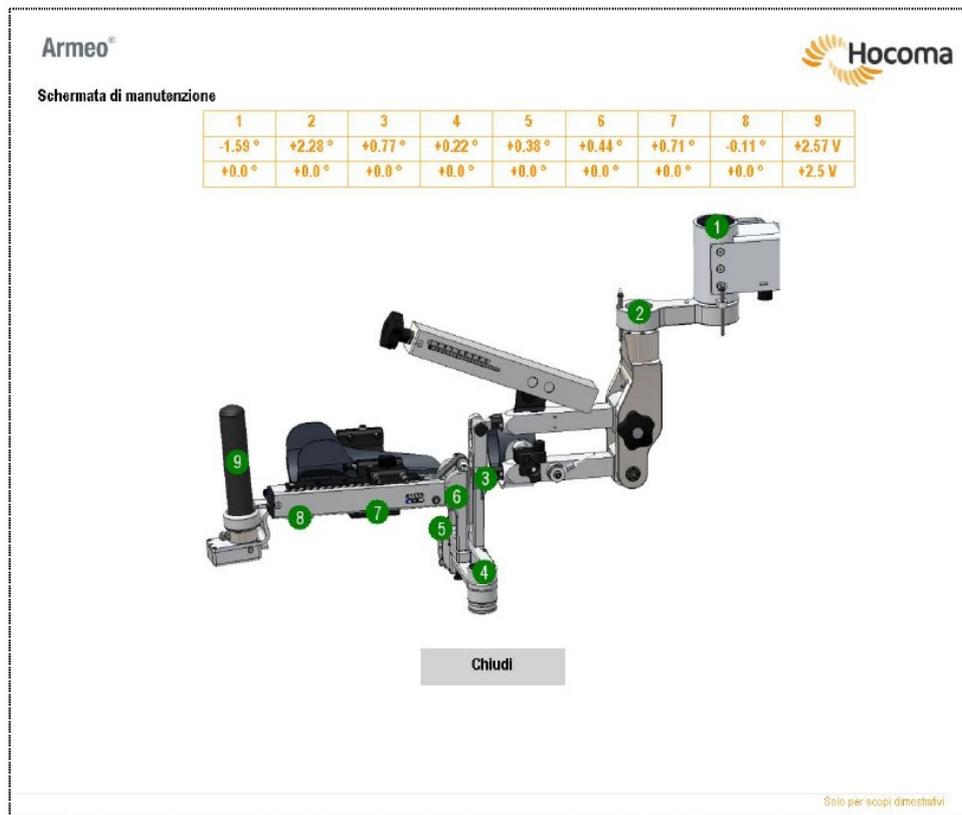


FIG. 2 – L' immagine mostra la posizione di ogni giunto meccanico dello strumento, nell' ordine in cui sono stati precedentemente elencati.

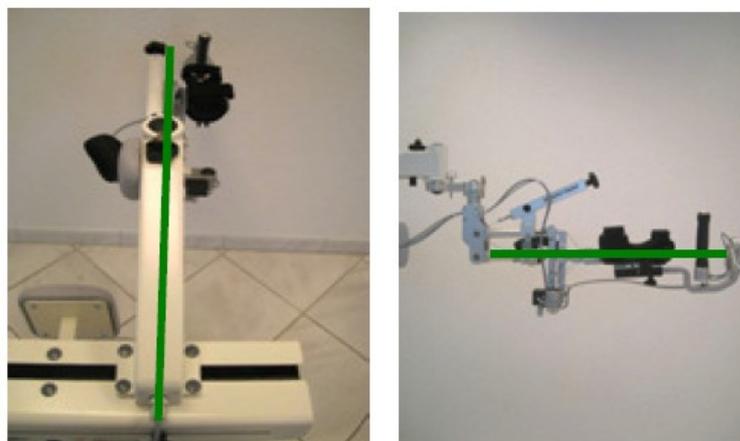


FIG. 3 – Posizione di riferimento: ortesi diritta rispetto alla colonna di sollevamento, parallela alla barra superiore, ed in posizione orizzontale rispetto al suolo.

Dei sensori raccolgono i dati dal dispositivo e li trasmettono ad un computer collegato allo strumento, dove vengono utilizzati per gestire su monitor la posizione di un cursore che permette di affrontare gli esercizi riabilitativi in ambiente virtuale.

Sia i parametri meccanici del robot (lunghezza e sgravio dei singoli segmenti) che le caratteristiche tecniche dei vari esercizi (difficoltà, durata, valori-soglia per la presa,..) possono essere modellati sulle capacità residue del soggetto, adattando *ad hoc* il carico di lavoro della seduta in funzione della situazione.

Il sistema fornisce due categorie di esercizi: gli *esercizi funzionali*, che sono quelli che il paziente svolge nel corso della seduta riabilitativa al fine del riapprendimento motorio, e gli *esercizi di valutazione*, che vengono utilizzati dai fisioterapisti che supervisionano il trattamento per verificare l'andamento della terapia.

Durante lo svolgimento di una qualunque di queste prove, il sistema permette di registrare l'angolo [°] di ognuno dei giunti dell'esoscheletro e la posizione dell'end-point nello spazio (con un sistema di coordinate x-y-z [cm]) rispetto alla posizione di riferimento, nonché il valore del sensore di pressione alloggiato nel manicotto distale, ad una frequenza di circa 45 Hertz.

Per gli esercizi di valutazione, il software dello strumento fornisce in output un ulteriore foglio di dati contenente informazioni circa quanto sta avvenendo sul monitor (posizione x-y del cursore, target preso/mancato,..) registrate ad una frequenza di circa 100 Hertz.

Le informazioni aggiuntive fornite in questo caso sono sufficienti per poter suddividere l'intero esercizio in singoli target ed isolare dei gesti motori che siano task-oriented nel senso stretto del termine (come il *reaching* di un bersaglio a partire da una certa posizione).

Per riassumere, è quindi possibile monitorare percorso e tempistica dei movimenti della mano, così come i contributi delle singole articolazioni e la pressione della mano.

2.1.2 Le valutazioni cliniche

Il personale del reparto di terapia occupazionale dell'ospedale Sol Et Salus effettua la valutazione delle capacità motorie dell'arto superiore attraverso un set di scale cliniche standardizzate, e di provata validità diagnostica, tra cui: Fugl-Meyer Assessment Scale [22], Jebsen Test [23, 24], Nine Hole Peg Test [25], Motor Activity Log [26], Barthel Index [27],

Wolf Motor Function Test [28], Modified Ashworth Scale [29], Modified Tardieu Scale [30], Medical Research Council [31].

Di tutti questi strumenti di valutazione, per lo studio effettuato è stato considerato unicamente il *Wolf Motor Function Test* (WMFT), per due ragioni: in primo luogo la valutazione su tale scala è il parametro che porta i terapisti del reparto a delineare quale approccio riabilitativo adottare per ogni paziente; inoltre il punteggio del WMFT viene assegnato sulla base delle funzionalità residue del soggetto nella produzione attiva di gesti motori, che è quanto si intende valutare quantitativamente utilizzando il dispositivo robotico.

Il WMFT quantifica l'abilità di movimento dell' arto superiore attraverso movimenti cronometrati e compiti funzionali. La valutazione richiede l' esecuzione di un set di 17 gesti (di cui 15 funzionali, e 2 di valutazione della forza) ordinati per complessità crescente; i movimenti richiesti prevedono inoltre un reclutamento progressivo nella direzione prossimale-distale. Il test viene somministrato nella primissima fase del processo riabilitativo, per individuare il percorso terapeutico più adeguato, ed al momento della dimissione per quantificare l' entità del recupero.

2.2 Indici biomeccanici di performance

Come precedentemente detto, il sistema effettua la registrazione di diverse variabili cinematiche che descrivono il movimento dell' arto durante l' esecuzione di un esercizio, nonché la pressione della mano sul sensore di pressione dell' impugnatura.

La posizione dell' end-point è fornita in un sistema di riferimento simmetrico rispetto alla posizione di riferimento del dispositivo, espresso in centimetri e definito per ognuna delle tre componenti nell' intervallo: [-100 cm; 100 cm].

La posizione angolare di ognuno degli 8 giunti dello strumento è espressa in gradi nell' intervallo [-180°; 180°] rispetto all' origine, definita anche in questo caso dalla posizione di riferimento.

La pressione sull' impugnatura è registrata in Volt, nel range [2.5 V; 5 V]; di conseguenza seppur rappresentativo, il parametro non dice nulla in termini di significato fisico della

variabile fornita.

Il software di sistema colleziona le informazioni relative ad i singoli esercizi in files di dati di tipo *csv* (*comma-separated value*), i quali sono stati acquisiti ed elaborati grazie alla piattaforma di calcolo scientifico MatLab (*The MathWorks®*, Inc.).

Dato che lo scopo della trattazione è stato quello di individuare una correlazione tra i parametri biomeccanici ottenibili dal robot riabilitativo e gli *scores* delle valutazioni cliniche, per evidenziare l' eventuale potenzialità di questi indici nell' essere rappresentativi delle capacità funzionali dell' arto, lo studio si è concentrato sugli esercizi di valutazione messi a disposizione dal dispositivo. Questo perchè, come è stato detto, la maggior quantità di informazioni disponibili per questa tipologia di prove ha permesso di suddividere gli esercizi in singoli gesti *task-oriented*; in questo modo è stato possibile sviluppare un numero maggiore di descrittori, che apparissero inoltre più significativi nel valutare la funzionalità residua.

E' necessario a questo punto fare una precisazione; gli esercizi di valutazione disponibili sul software sono tre: due di questi (*Cattura Verticale* e *Tempo di Reazione*) valutano la capacità motoria nel piano frontale, mentre il terzo (*Cattura Orizzontale*) richiede il movimento dell' arto nel piano sagittale. Avendo a disposizione unicamente le prove già presenti in archivio, i dati utilizzati nel presente lavoro sono relativi all' unica modalità *Cattura Verticale*: in questo caso caso l' esercizio prevede i movimenti di flesso-estensione e ab-/adduzione orizzontale della spalla e di flesso-estensione del gomito, mentre viene vincolato l' intervento della parte distale. Al soggetto è richiesto di toccare dei target sullo schermo che appaiono in diversi punti dell' area di lavoro:



| | Area di lavoro (larghezza x altezza) | Oggetti |
|-----------|---|---------|
| Livello 1 | 40 x 30 cm | 12 |
| Livello 2 | 45 x 36 cm | 20 |
| Livello 3 | 56 x 40cm | 30 |
| Livello 4 | 63 x 49cm | 48 |

FIG. 4 – Sulla sinistra è mostrata una immagine su monitor dell' esercizio *Cattura Verticale*, e sulla destra le impostazioni relative a target e area di lavoro a seconda delle difficoltà.

L' esercizio *Cattura Orizzontale* non è stato mai somministrato per via di un problema del software nella gestione del puntatore, mentre del test *Tempo di Reazione* erano presenti in data-base un numero minimo di ripetizioni, per cui sarebbe stato impossibile impostare uno studio.

Sono stati implementati un insieme di 24 indici descrittivi: 22 estrapolati dalle grandezze relative al movimento dell' arto, e 2 ricavati dal sensore di pressione nell' impugnatura.

Dei primi, 12 parametri sono associati all' estensione del movimento (ROM, *Range Of Motion*) e 10 alla *smoothness* del gesto (intesa come “liscezza” o uniformità del pattern motorio; è una misura della capacità del soggetto di essere accurato ed efficace).

Data la necessità di effettuare delle derivazioni numeriche dei dati grezzi forniti dal dispositivo, si è reso necessario il filtraggio delle grandezze cinematiche utilizzate per il calcolo.

A questo proposito si evidenzia un limite tecnico del sistema, che consiste nel campionamento dei dati con un passo variabile: il fenomeno viene precisato nel foglio delle specifiche operative fornito dallo stesso staff tecnico Hocoma (in cui si parla di campionamenti eseguiti a circa 45/100 Hz), ed è stato inoltre verificato direttamente sul vettore degli istanti temporali associato ai files di dati.

Per superare questo limite e consentire il filtraggio su segnali caratterizzati da una frequenza di campionamento fissa, è stato necessario innanzitutto *ri-campionare* i dati: l' operazione è stata eseguita calcolando prima il nuovo vettore temporale, ottenuto dall' asse dei tempi originario considerando gli estremi dell' intervallo e suddividendolo in un numero di istanti pari a quello del vettore in ingresso. Successivamente si è operato il ri-campionamento di tutte le variabili cinematiche negli istanti temporali definiti dal nuovo asse dei tempi; la frequenza del segnale ricampionato (adesso resa uniforme) è ottenibile come l' inverso del passo temporale tra due campioni consecutivi.

A questo punto è possibile effettuare il filtraggio digitale dei segnali; si è scelto di operare un filtraggio di tipo passa-basso con una frequenza di taglio di 15 Hertz, che si pone all' interno dell' intervallo di valori riscontrati su studi analoghi in letteratura [32-39].

Nella quasi totalità di queste pubblicazioni lo strumento utilizzato è un filtro di Butterworth,

di ordine variabile, scelto per la massima uniformità della curva caratteristica in banda passante. Nel nostro caso tuttavia, sono state utilizzate delle funzioni *built-in* di Matlab che richiedono come argomenti le pulsazioni di banda passante e attenuata normalizzate rispetto alla frequenza di Nyquist ($F_s/2$, nel nostro caso quindi pari – nel caso “peggiore” – a 22.5 Hz); scegliere come frequenza di taglio 15 Hertz porta al valore: $W_{stop} = 15/22.5 \sim 0.66$, che rappresenta una pulsazione abbastanza elevata per un filtro di Butterworth.

Per questa ragione si è ritenuto opportuno adottare un filtro ellittico, utilizzando le seguenti impostazioni:

- Frequenza di taglio: 15 Hertz
- Ampiezza picco-picco per il *ripple* del filtro: 0.5 dB
- Attenuazione di banda alla frequenza di taglio: 60 dB

Nella derivazione degli indici biomeccanici, il primo valore di ognuno dei segnali è stato scartato, a causa di evidenti discontinuità riscontrate con i campioni successivi.

Di seguito vengono delineati i descrittori estrapolati per lo studio, evidenziandone le caratteristiche.

2.2.1 Indici di R.O.M. (*Range Of Motion*)

Gli 11 parametri del ROM sono ottenuti come differenza tra i valori massimi e minimi delle variabili cinematiche del robot, e descrivono la massima estensione del movimento registrata durante lo svolgimento di un esercizio in corrispondenza dei giunti del dispositivo:

- Spalla: *Inner/Outer Shoulder Angle* [°] – rotazione della spalla nel piano orizzontale
Upper Arm Angle [°] – rotazione della spalla nel piano verticale
- Gomito: *Upper/Lower Elbow Angle* [°] - rotazione del gomito nel piano orizzontale
Forearm Angle [°] – rotazione del gomito nel piano verticale
- Polso: *Pro-Supination Angle* [°] - angolo di prono-supinazione del polso
Flex-Extension Angle [°] - angolo di dorsi-flessione del polso
- End-point: coordinate \underline{x} , \underline{y} , \underline{z} [cm]

Le figure 5 e 6 mostrano gli andamenti della traiettoria dell' end-point nel piano XY – la superficie “operativa” dell' esercizio *Cattura Verticale* – e l' entità dello spostamento in uno dei giunti del dispositivo (il giunto 2 per il movimento orizzontale della spalla):

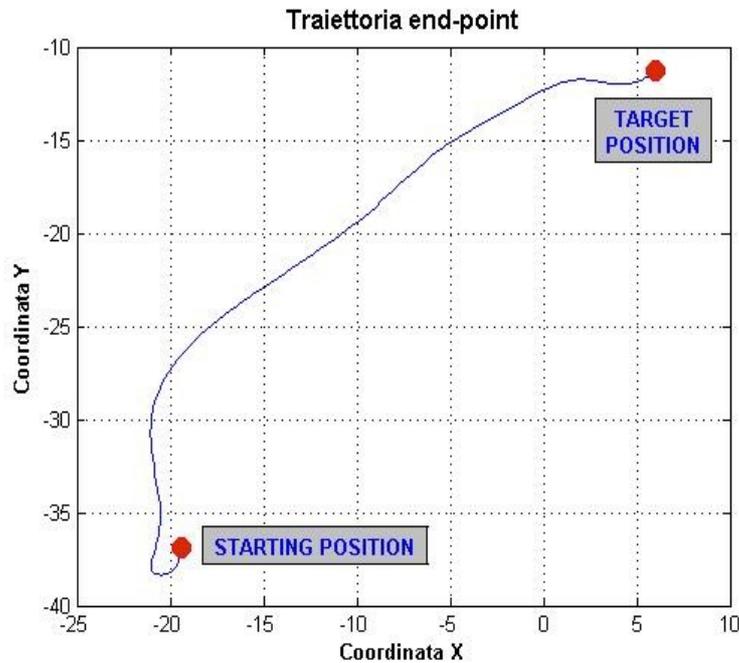


FIG. 5 – Traiettoria dell' end-point, su cui viene calcolato il R.O.M. delle tre coordinate che individuano la posizione del manico distale nello spazio del dispositivo

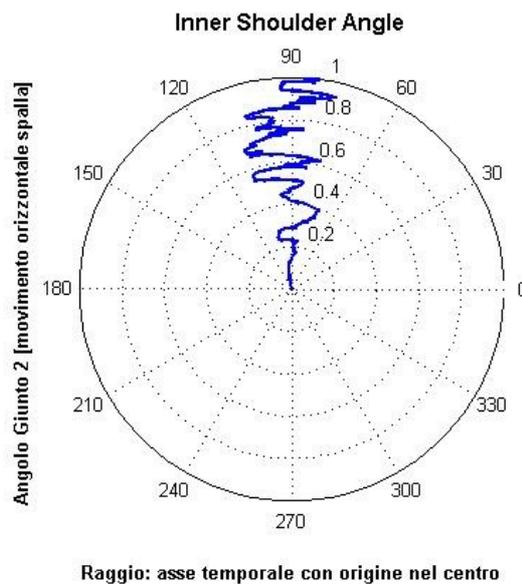


FIG. 6 – Andamento temporale di uno degli angoli dei giunti articolari del dispositivo. Il R.O.M. è calcolato come differenza – in valore assoluto – tra valori massimi e minimi registrati.

Si fa notare che negli esercizi considerati è stato calcolato il ROM per ognuna delle variabili fornite in output dallo strumento, ma alcuni dei giunti del dispositivo venivano bloccati durante l' esecuzione (in particolare quelli per il movimento del polso) e di conseguenza sono inutilizzabili ai fini della trattazione.

2.2.2 Indici di *smoothness*

Descrittori di velocità

Sebbene non sia esattamente un indicatore dell' accuratezza del movimento, la velocità è una grandezza che può descrivere la facilità nel compimento di un gesto motorio; per questo motivo sono stati calcolati, relativamente ai singoli tasks di cattura dei target nel corso di un esercizio, i seguenti parametri:

- Velocità massima: il massimo valore registrato durante l' esecuzione del task.
- Velocità media: valor medio del profilo di velocità, relativo al *reaching* del target.
- Rapporto tra velocità media e massima [40], registrate nello svolgimento dei gesti motori.
- Numero di picchi nel profilo di velocità: un numero inferiore di picchi nel profilo di velocità è associabile ad un miglior paradigma motorio [41].

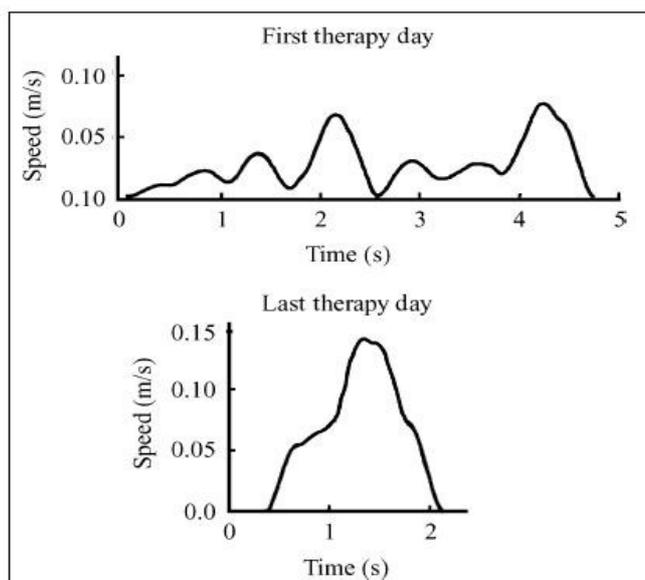


FIG. 7 – L' immagine mostra l' andamento del profilo di velocità durante lo svolgimento di un esercizio su dispositivo robotico, all' ingresso ed alla dimissione dalla terapia [22].

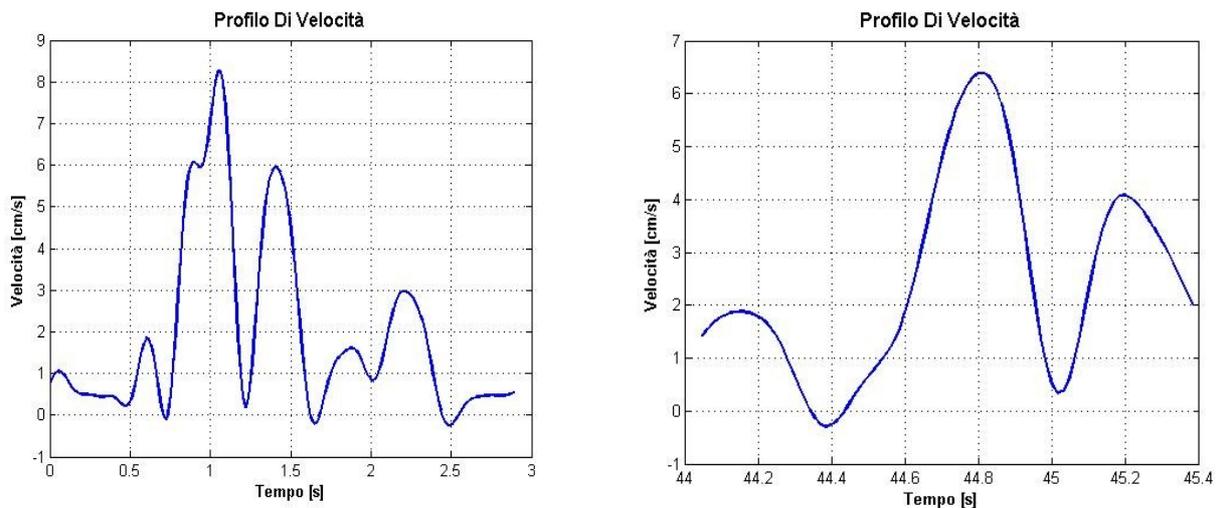


FIG. 8 – Andamento dei profili di velocità in un momento intermedio della terapia [sinistra] e nella fase finale del trattamento [destra] per uno dei pazienti inseriti nello studio.

E' evidente l' affinità con gli studi consultabili in letteratura.

La velocità lungo ognuna delle direzioni è stata ottenuta a partire dalle coordinate dell' end-point (preventivamente filtrate) per derivazione numerica con il metodo delle differenze centrali. Il profilo di velocità nello spazio è stato ricostruito utilizzando le tre componenti del vettore.

Descrittori di sovraelongazione

Nel gesto del *reaching* di un target, la capacità di un soggetto di pianificare ed eseguire una traiettoria minima può essere rappresentativa dell' efficacia del gesto motorio prodotto.

A questo scopo sono stati sviluppati 4 descrittori:

- Hand Path Ratio: rapporto tra estensione della traiettoria percorsa dall' end-point e distanza minima tra punto di partenza e posizione del target.

Il concetto è illustrato nella figura alla pagina seguente.

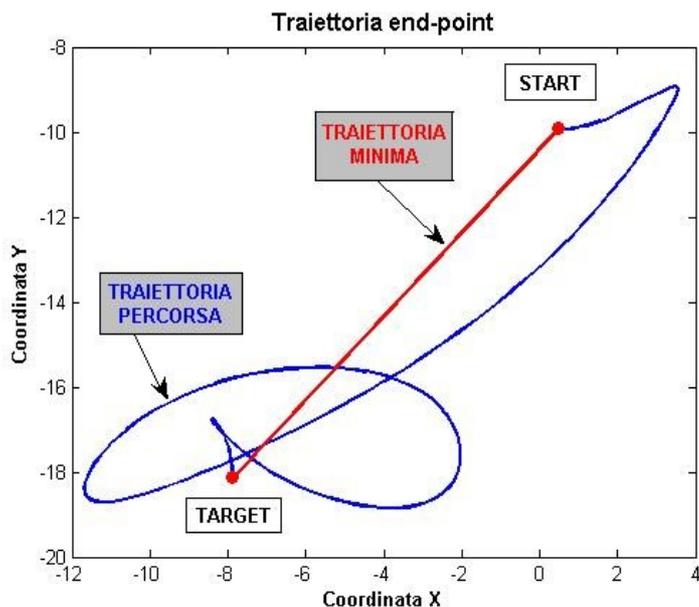


FIG. 9 – Concetto di *Hand Path Ratio*: rapporto tra traiettoria percorsa e traiettoria minima.

- *Sovraelongazione locale*: il concetto è analogo a quello appena descritto, ma in questo caso si valuta l' accuratezza del paziente calcolando la sovravelongazione in prossimità del target. Si fa notare che da questo punto di vista un certo grado di "imprecisione" risulta fisiologico anche per soggetti sani; per questa ragione questa tipologia di *overshoot* viene registrata al di fuori di una zona di tolleranza centrata sul bersaglio, ed avente un raggio prefissato di 3 cm.

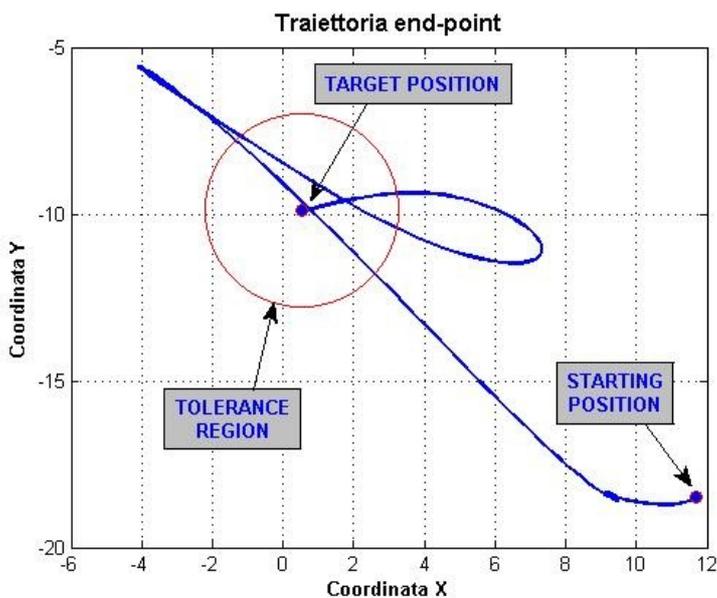


FIG. 10 – Sovraelongazione locale: rapporto tra distanza percorsa dall' ingresso nella regione di tolleranza fino al raggiungimento del target, normalizzata sul raggio del cerchio (3 cm).

- Overshoot globale: tre indici che quantificano l' overshoot del movimento nelle tre direzioni, durante il raggiungimento del bersaglio; sono definiti come massima estensione raggiunta lungo le coordinate x, y, z dall' end-point, normalizzata rispetto alla minima distanza lungo l' asse interessato (definita sulla posizione iniziale del puntatore e quella del target da raggiungere). Si fa notare che per l' esercizio considerato, essendo definito sul piano verticale, l' overshoot lungo la direzione Z è stato fornito in valore assoluto, essendo “0” l' escursione ottima durante l' esecuzione.

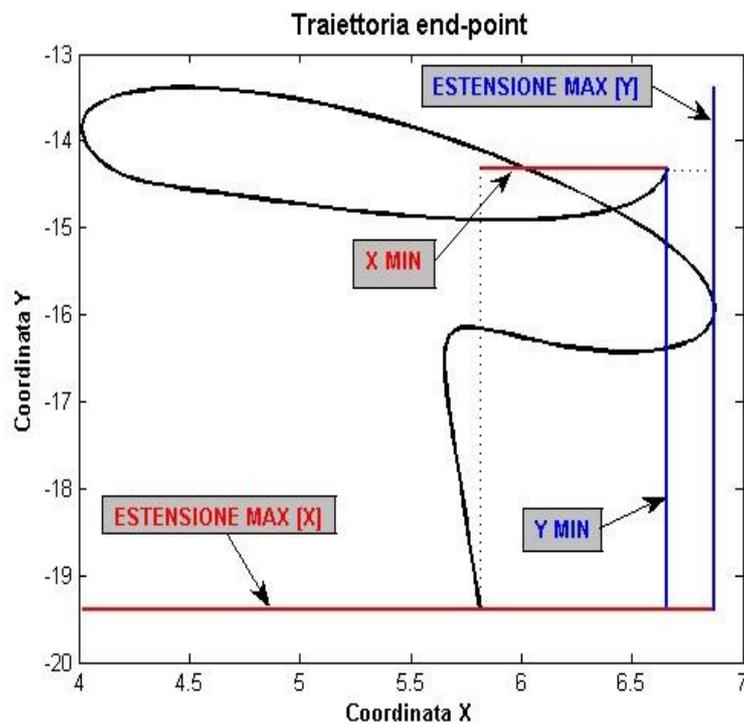


FIG. 11 – Overshoot globale, illustrato per semplicità sul solo piano XY: rapporto tra massima estensione su una direzione, e minima distanza sullo stesso asse.

Misura del JERK

Il *JERK* rappresenta la derivata terza dello spostamento, ed è comunemente utilizzato per la valutazione della *smoothness* di un gesto motorio; anche in questo caso sarà presa in considerazione la posizione dell' end-point espressa in coordinate cartesiane.

Esistono numerose realizzazioni per la stima del jerk in letteratura; nel nostro caso è stato seguito il modello che prevede l' utilizzo del jerk quadrato integrato sulla durata del task motorio. La grandezza trovata è stata successivamente adimensionalizzata rispetto alla durata del gesto ed alla distanza percorsa durante l' esecuzione [41].

Per limitare l' "esplosione" dell' incertezza nella computazione della derivata terza, una operazione di filtraggio passa-basso è stata effettuata in seguito ad ogni derivazione numerica successiva.

Si fa notare inoltre che l' affidabilità del calcolo del jerk è stata validata utilizzando la medesima funzione-test applicata nella pubblicazione cui si fa riferimento:

$$x(t) = A \left(\frac{t}{D} - \sin \left(\frac{2\pi t}{D} \right) \frac{(1-b)}{2\pi} - \sin \left(\frac{2n\pi t}{D} \right) \frac{b}{2n\pi} \right)$$

La funzione include (a) una rampa lineare finita, (b) una senoide con periodo uguale alla durata del movimento e (c) una senoide avente periodo pari ad un sotto-multiplo, individuato con n , della durata del movimento. Il confronto tra esito del test e corrispondente risultato in letteratura è mostrato nelle figure che seguono:

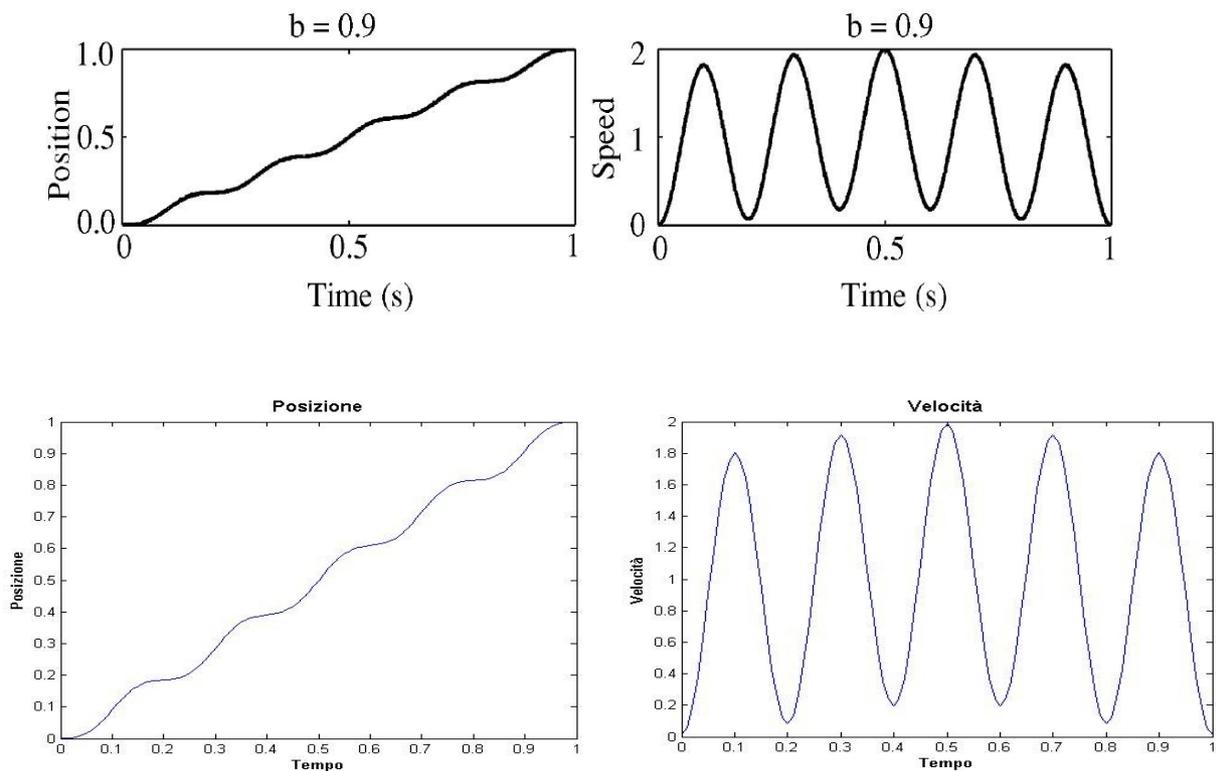


FIG. 12 – Confronto tra funzione utilizzata nello studio di riferimento e funzione implementata in MatLab per testare il calcolo del jerk adimensionalizzato.

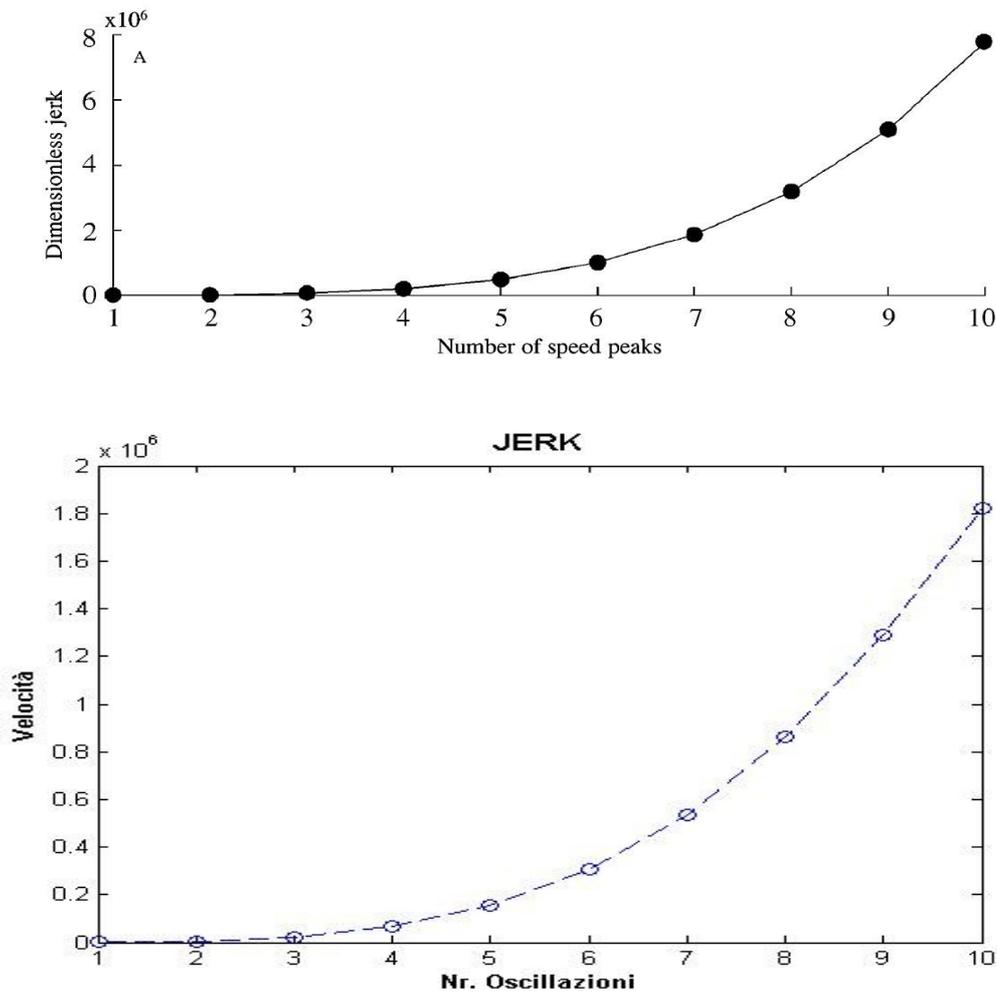


FIG. 13 – Esito del test sul jerk, per valutare la sensibilità del parametro al numero di oscillazioni nel profilo di velocità.

La verifica è stata condotta utilizzando i valori: $A=1$; $D=1$; $b=0.9$.

2.2.3 Indici di pressione della mano

Relativamente al sensore di pressione posto nell'impugnatura, durante il raggiungimento di ogni target nello svolgimento di un esercizio sono stati estrapolati il range dell'intervallo del segnale di pressione, nonché il valore medio calcolato durante lo svolgimento.

L'esercizio *Cattura Verticale* non richiede la presa della mano, ma al fine di non precludere sviluppi futuri dell'applicazione MatLab la grandezza è stata elaborata comunque; inoltre un qualche cambiamento dovuto alla terapia potrebbe essere evidenziato anche da un diverso atteggiamento del soggetto nella pressione sviluppata sull'end-point.

2.3 Scelta e caratteristiche dei soggetti inclusi nello studio

Quella della riabilitazione robotica è una realtà che è stata introdotta all' interno del reparto di riabilitazione neuro-motoria dell' ospedale Sol Et Salus solo di recente (circa 6 mesi); inoltre il personale fisioterapico non dispone ancora di protocolli standardizzati che prevedano la combinazione strutturata di riabilitazione robotica, terapia tradizionale e valutazioni cliniche. Di fatto il percorso di omologazione delle procedure è ancora in fase di evoluzione.

Di conseguenza a causa della scarsità del numero e dell' omogeneità delle informazioni sui pazienti (in particolar modo relativamente alle scale cliniche adottate di volta in volta) sono stati inclusi nella trattazione solamente 6 soggetti, ovvero quelli che presentassero nella storia clinica una o più valutazioni effettuate con il *Wolf Motor Function Test* (la ragione è stata precedentemente illustrata). Un ulteriore criterio di scelta degli elementi del campione, è stata la presenza di una o più ripetizioni dell' esercizio *Cattura Verticale* condotte in una finestra temporale di 2 settimane a partire dal giorno della valutazione; nel caso fossero presenti più prove, condotte in giorni diversi, è stato utilizzato il giorno di terapia più vicino a quello della valutazione clinica. Si è scelto tale intervallo per due ragioni: per inserire un numero maggiore di campioni – di un insieme già esiguo – nella trattazione, e per allinearci al vincolo utilizzato in uno studio affine a quello presentato [42].

I 6 pazienti considerati, di età compresa tra i 21 ed i 67 anni, erano caratterizzati da un grado più o meno invalidante di emi-/tetra- paresi ed erano tutti nella fase cronica del trauma; il criterio di ammissione alla riabilitazione con lo strumento Armeo®Spring da parte dei fisioterapisti è stato la capacità dei soggetti di svolgere gesti elementari, anche con un certo livello di assistenza, come quelli richiesti nella somministrazione del WMFT.

Trattandosi di una indagine retrospettiva, e non di uno studio strutturato, non si dispone di un gruppo di controllo; inoltre non sono state monitorate eventuali attività svolte dai pazienti al di fuori della terapia, anche per via del fatto che alcuni di essi erano degenti presso la struttura ed altri avevano invece attivato un trattamento riabilitativo come clienti esterni.

Il vincolo che i soggetti inclusi nello studio presentassero una valutazione clinica

all' interno del proprio percorso terapeutico è stato imprescindibile, visto l' intento che ci si è prefissati di individuare l' eventuale capacità del dispositivo di fornire degli indici rappresentativi dello stato clinico della persona in cura.

E' anche per questo che è stato impossibile realizzare una analisi di valutazione pre-/post- trattamento, che sarebbe stata significativa e di grande interesse.

2.4 Analisi statistica

L' approccio statistico seguito relativamente ai dati sperimentali è stato fortemente influenzato dalla quantità di informazioni disponibili per lo studio.

Come è stato ribadito più volte, il lavoro espone una indagine retrospettiva su pazienti assegnati ad un trattamento di riabilitazione robotica; di conseguenza, trattandosi di uno studio “di archivio” su dati appartenenti ad eventi passati, si è potuto procedere unicamente in funzione della quantità di informazioni presente in data-base.

Sebbene i soggetti che ad oggi hanno utilizzato l' Armeo®Spring (e che quindi presentano una certa quantità di files relativi agli esercizi) siano oltre 20, il numero di pazienti effettivamente inclusi nello studio è ridotto a quelli che sono stati valutati almeno una volta con il punteggio Wolf; questo perchè per poter inferire sulle potenzialità degli indici ricavati dal robot nel descrivere le capacità motorie dell' arto superiore, è necessario disporre di uno o più parametri – di efficacia validata, in termini clinici – che possano essere utilizzati come termini di paragone nello studio.

In totale sono stati considerati 6 pazienti, a cui sono associate 10 valutazioni cliniche per mezzo del WMFT (4 soggetti sono stati sottoposti al test 2 volte, all' ingresso e alla dimissione dalla terapia).

Per quanto riguarda gli esercizi sul robot, per ogni valutazione clinica è stato scelto un giorno di terapia che presentasse almeno una esecuzione dell' esercizio *Cattura Verticale* (compatibilmente con i vincoli precedentemente delineati); si fa notare che è stata ritenuta sufficiente ai fini dello studio la presenza anche di una sola ripetizione della prova per la possibilità di suddividere l' intero svolgimento in singoli task: essendo 12 il numero minimo di bersagli da raggiungere durante l' esercizio, è stato possibile effettuare una stima degli

indici calcolati anche avendo a disposizione una singola prova. Ad ogni modo, se presenti in un numero maggiore, sono state considerate tutte le ripetizioni svolte nel giorno considerato. A questo punto è necessario fare una precisazione; la routine tipica di uno studio di inferenza statistica prevede lo sviluppo delle seguenti fasi:

- Impostazione e studio del modello statistico [scelta delle ipotesi operative].
- Verifica delle ipotesi [ES: test di normalità sulla distribuzione delle popolazioni].
- Test di ripetibilità sui dati, o misura della dispersione dei valori nel campione.
- Inferenza statistica sulla/sulle popolazioni: tipicamente studi predittivi o di regressione su modelli predefiniti, test delle ipotesi di significatività statistica.

Nel nostro caso è opportuno in prima analisi fare le seguenti considerazioni:

- In generale per l'arto superiore esiste una variabilità maggiore dei paradigmi motori anche tra soggetti sani, rispetto a gesti come l'esecuzione del cammino.
- Una fonte di variabilità ulteriore si manifesta trasversalmente tra i pazienti a causa delle diverse condizioni cliniche, e delle diverse cause dell'invalidità, ad essi associate.
- Il numero di campioni a disposizione (10 per ognuno dei descrittori utilizzati) appare esiguo per la realizzazione di un test di verifica della normalità statistica.

Per queste ragioni si è scartata l'ipotesi di normalità statistica sulla distribuzione dei dati.

Volendo determinare la capacità degli indici ottenibili con il dispositivo di classificare lo stato clinico di un soggetto, l'obiettivo prefissato per lo studio era quello di effettuare una regressione dei dati sulle valutazioni ottenute con le scale. Tuttavia lo scarso numero di campioni a disposizione avrebbe afflitto l'affidabilità del risultato statistico.

Di conseguenza si è scelto di condurre uno studio osservazionale mettendo a confronto i risultati delle valutazioni cliniche con i corrispondenti valori degli indici – presi uno per volta e ottenuti sul *reaching* dei singoli target – dei pazienti inclusi nella trattazione.

La rappresentazione dei risultati ottenuti sul dispositivo è stata effettuata con dei *boxplot*, di estensione pari alla distanza interquartile ed evidenziando la mediana; si è scelto di includere tutti i valori compresi tra 10° e 90° percentile (larghezza dei *whiskers*) ed

escludere gli *outliers* dal diagramma.

Si fa notare che la distanza interquartile, definita come l' intervallo che intercorre tra il 25° ed il 75° percentile, offre una buona rappresentazione della dispersione dei dati mentre la mediana costituisce il miglior stimatore del valore atteso in presenza di distribuzioni statistiche non normali o fortemente asimmetriche.

Ciò che si intende fare è riscontrare un elemento di correlazione tra gli andamenti dei risultati delle valutazioni cliniche e quelli dei descrittori sviluppati per descrivere le performance motorie.

CAPITOLO 3

RISULTATI

La presente sezione vuole esporre i risultati ottenuti con lo studio condotto. I diagrammi che seguono mostrano i valori degli indici biomeccanici, calcolati sugli esercizi svolti e visualizzati nella modalità del *box-and-whisker plot*, in funzione dei punteggi ottenuti con la valutazione mediante scala WMFT.

I boxplot sono stati costruiti considerando per i valori l' intervallo tra il 10° ed il 90° percentile, in modo da escludere dalla rappresentazione i valori-limite registrati per le variabili; per questo motivo gli *outliers* non vengono inseriti nei grafici. All' interno dei singoli box la linea rossa in evidenza costituisce la mediana della serie di dati.

L' obiettivo è quello di individuare quei parametri quantitativi in grado di rappresentare lo stato clinico di un paziente sottoposto ad un programma di riabilitazione neurologica mediato da dispositivi robotici.

La struttura del capitolo segue l' ordine in cui sono state descritte le variabili biomeccaniche: verranno presentati i risultati relativi ad i parametri per il ROM, seguiti dagli indici di smoothness e da quelli relativi alla pressione della mano sull' end-point.

Si fa notare che verranno mostrati solo i risultati ritenuti più rilevanti dato che diversi dei descrittori cinematici hanno presentato un output privo di significato, per ragioni che verranno spiegate più avanti.

La scelta di un solo grafico per pagina è stata dettata dalla volontà di mantenere una risoluzione adeguata per le immagini, che veniva inficiata in maniera sensibile anche con un ridimensionamento minimo.

3.1 Indici di R.O.M.

3.1.1 Coordinate X, Y, Z [end-point]

L' esito dell' indagine sull' estensione del movimento dell' end-point nelle tre direzioni non ha portato risultati significativi. In particolare, il R.O.M. per le coordinate X e Y non mostra alcuna sensibilità all' esito delle valutazioni cliniche e le mediane vengono a trovarsi all' interno di un ristretto intervallo di valori; nella direzione Z, in cui il movimento della parte distale non influisce sull' azione del puntatore, l' indice appare ulteriormente inconsistente con “salti” nei valori delle mediane privi di significato.

3.1.2 Range articolari

Giunti Distali [spalla]

Il R.O.M. dei giunti 1 e 2 per il movimento nel piano orizzontale della spalla non ha mostrato andamenti significativi in relazione alle valutazioni cliniche.

Si fa notare che la distribuzione dei dati per il giunto 2 mostra una dispersione maggiore con l' aumento dell' esito della valutazione clinica, osservabile in Figura 1.

Si riporta inoltre il risultato ottenuto per il giunto 3 (movimento nel piano verticale della spalla), in cui una minima sensibilità del parametro, osservando le mediane, sembra emergere in funzione delle valutazioni funzionali; anche in questo caso, a punteggi più elevati sembra corrispondere una dispersione maggiore dei valori.

I grafici delle due variabili discusse vengono mostrati nella pagina seguente.

FIG. 1 – Esito dello studio di correlazione per il giunto 2 del dispositivo.
Si evidenzia un aumento della dispersione dei dati al crescere del punteggio WMFT.

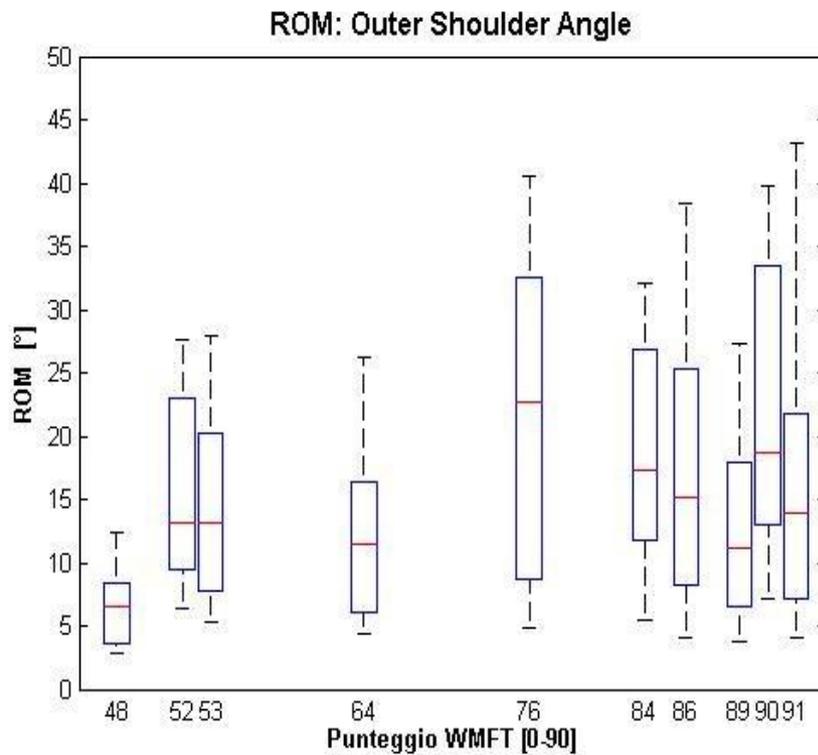
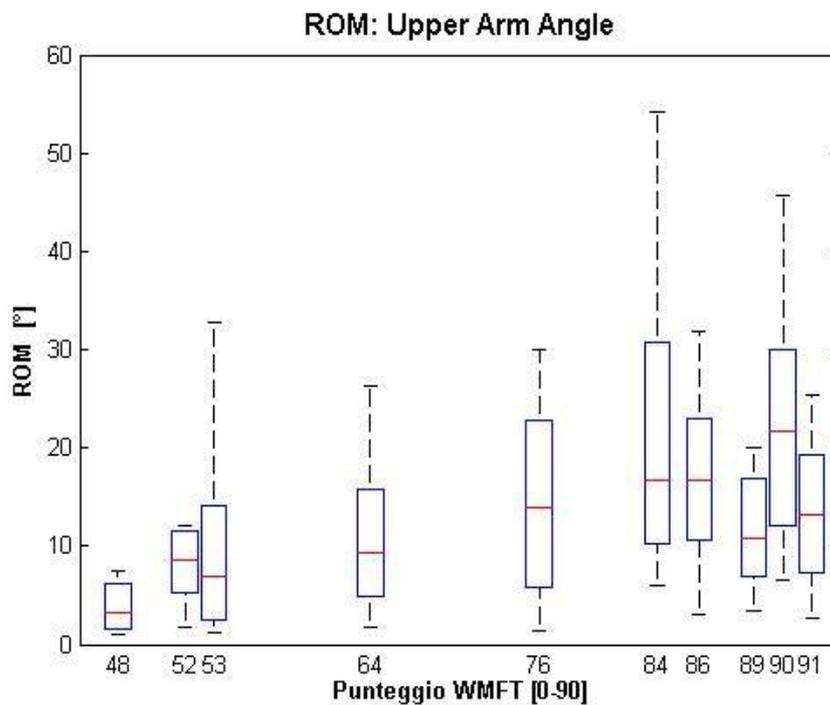


FIG. 2 – Andamento del R.O.M. per il giunto 3, associato al movimento della spalla nel piano verticale.



Giunti intermedi [gomito]

Per i giunti 4 e 5, che permettono la rotazione del gomito nel piano orizzontale, è stato impossibile effettuare una analisi: in entrambi i casi infatti non sono disponibili i dati di metà del campione, per via della scelta effettuata dal personale fisioterapico di bloccare le giunture considerate durante lo svolgimento degli esercizi.

Il giunto 6, per la rotazione del gomito nel piano verticale, non evidenzia una sensibilità nell' andamento del R.O.M. in funzione dei punteggi ottenuti con le valutazioni cliniche ed il corrispondente grafico è stato quindi omesso.

Giunti distali [polso]

Per lo svolgimento dell' esercizio *Cattura Verticale* i terapisti hanno adottato in ogni situazione la scelta di vincolare l' azione del polso, irrilevante ai fini dell' esecuzione; di conseguenza anche in questo caso è stato impossibile indagare la correlazione con le valutazioni effettuate mediante scala WMFT.

3.2 Indici di smoothness

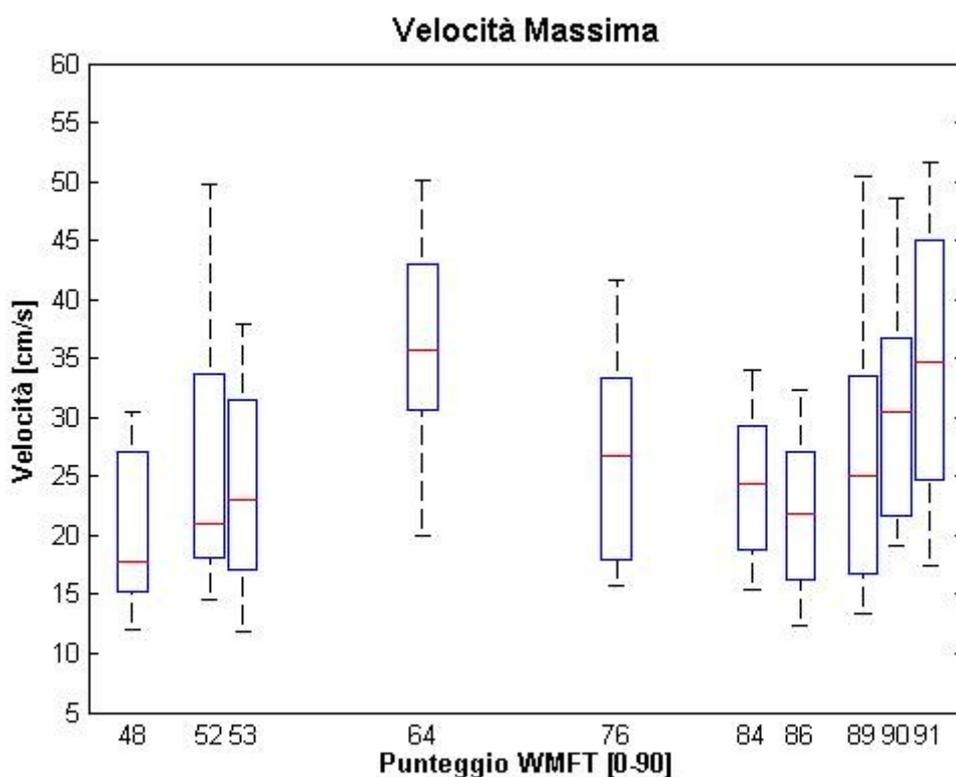
3.2.1 Descrittori di velocità

Velocità massima

Non sembra esserci correlazione significativa tra velocità massima registrata durante l'esecuzione degli esercizi e corrispondente valutazione clinica.

Si riscontra una maggiore asimmetria della distribuzione di dati per punteggi inferiori della scala WMFT.

FIG. 3 – La distribuzione dei valori per l'indice di velocità massima mostra una maggior asimmetria per valutazioni più basse della scala clinica.

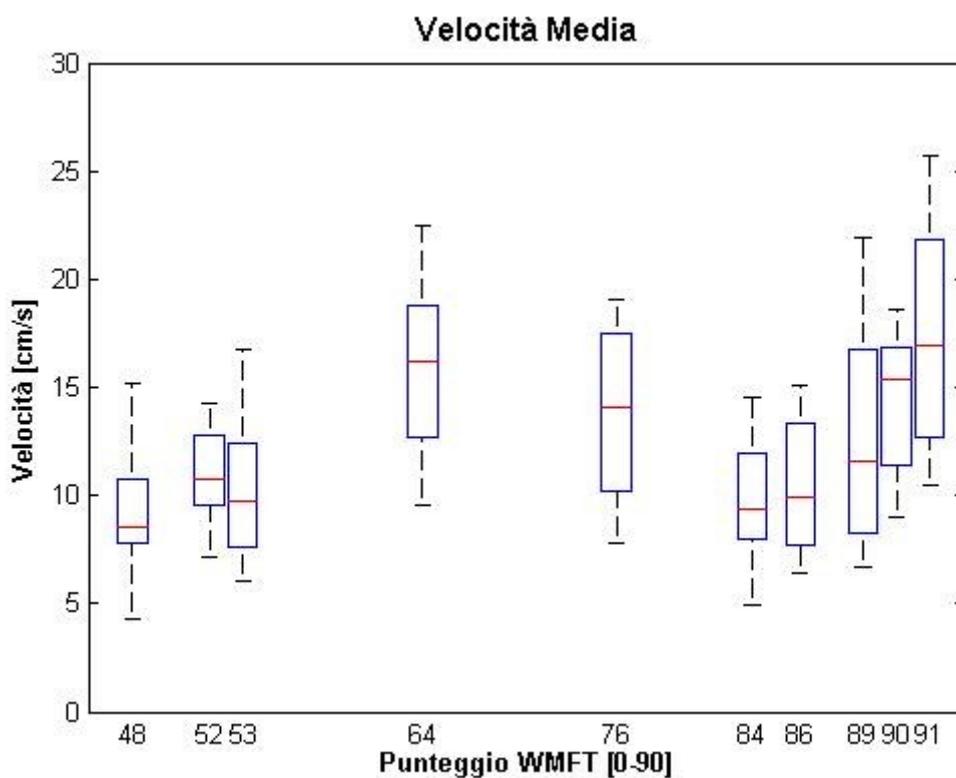


Velocità media

Anche in questo caso l' indice appare insensibile agli *scores* ottenuti con la scala Wolf; si fa notare una minor dispersione dei valori in corrispondenza dei punteggi clinici inferiori.

L' andamento delle distribuzioni di dati è affine a quello registrato per la variabile velocità massima.

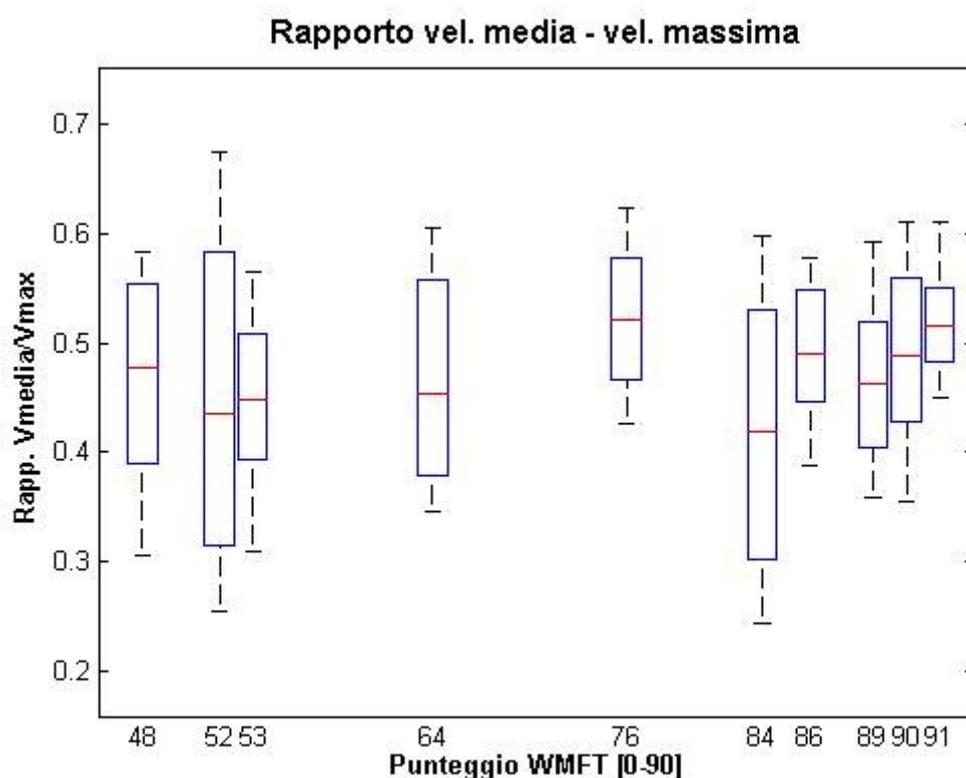
FIG. 4 – Distribuzione dei valori per la velocità media;
a punteggi più bassi sembra corrispondere una minor dispersione dei dati.



Rapporto velocità media – velocità massima

I box corrispondenti ad i singoli pazienti, e le rispettive mediane, hanno andamenti del tutto non-correlati rispetto alle valutazioni funzionali; ciò che si evidenzia è una minor dispersione dei dati in corrispondenza di punteggi più alti.

FIG. 5 – Andamento degli indici per i diversi pazienti;
a punteggi più alti sembra essere associata una minor dispersione dei dati.



Numero di picchi nel profilo di velocità

Questo parametro, analogamente ad altri, si è dimostrato insensibile alle valutazioni fatte tramite test funzionale. Per questo motivo, la visualizzazione dell' esito dell' indagine è stata omessa.

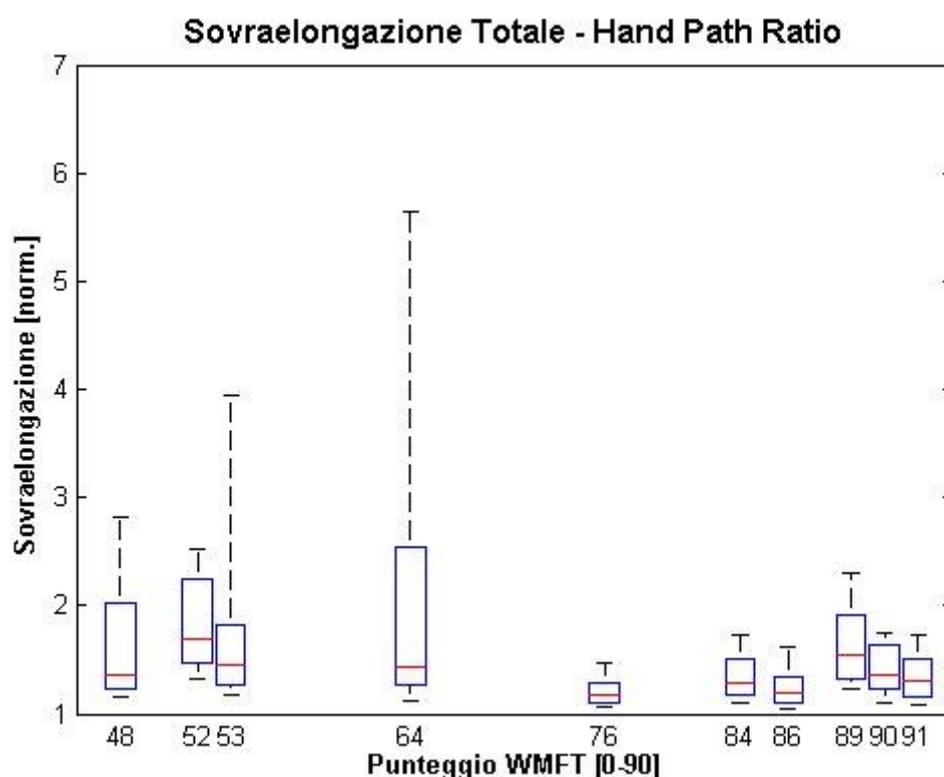
3.2.2 Descrittori di sovraelongazione

Sovraelongazione totale - Hand Path Ratio

Nessuna evidenza significativa di correlazione appare osservando i risultati relativi alla sovraelongazione totale nel *reaching* di un target.

Le mediane sono confinate all' interno di un ristretto range di valori, tuttavia si osserva una minor dispersione dei dati in corrispondenza di punteggi clinici più elevati.

FIG. 6 – Andamento delle distribuzioni per il parametro *Hand Path Ratio*.
A valutazioni cliniche più alte corrisponde una minor dispersione dei dati.



Sovraelongazione locale, Overshoot Globale

Nessun andamento significativo è stato riscontrato per gli indici considerati, né caratteristiche particolarmente indicative. I risultati vengono quindi esclusi dalla trattazione.

3.2.3 Misura del jerk adimensionalizzato

L' indice di jerk ha mostrato un comportamento irregolare in funzione dei punteggi del test clinico e risulta inefficace nella valutazione funzionale dello stato dei pazienti.

3.3 Indici di pressione sull' end-point

Questi parametri si sono mostrati in assoluto quelli meno indicativi, con valori fortemente discontinui tra campioni contigui e nessuna caratteristica associabile alle distribuzioni di dati. Per questa ragione, come è stato fatto per molte delle variabili considerate, i risultati non vengono inclusi nella trattazione.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

4.1 Interpretazione dei risultati

Come è stato più volte ribadito, l' obiettivo del presente lavoro è stato quello di indagare la capacità di un set di parametri quantitativi estrapolati dal dispositivo passivo Armeo®Spring di rappresentare lo stato clinico di un soggetto partecipante ad un programma di riabilitazione mediata da robot, ed espresso attraverso il punteggio ottenuto applicando il *Wolf Motor Function Test*.

I descrittori implementati per lo studio sono di tre tipologie: indici di R.O.M., relativi all' estensione del movimento della mano e delle singole articolazioni, indici di smoothness rappresentativi in qualche modo dell' accuratezza e dell' efficacia del movimento, e parametri di pressione della mano associati alla presa sull' impugnatura distale.

4.1.1 Indici di R.O.M.

Considerando la posizione dell' end-point, nessuno dei parametri si è mostrato in grado di classificare lo stato clinico del paziente. E' bene considerare che le coordinate dell' estremità distale controllano direttamente la posizione del cursore sul monitor, al quale si richiede di raggiungere i target che vengono presentati durante lo svolgimento dell' esercizio e che appaiono in punti variabili dell' area di lavoro; di conseguenza il R.O.M. dinamico dell' end-point riflette la distanza tra bersagli successivi, ed è giustificabile con questa motivazione l' assenza di significato clinico associata a questi parametri.

Consideriamo ora i giunti articolari: l' azione del polso è stata volontariamente inibita durante l' esecuzione dei task, così come quella a livello del gomito e per questo motivo non è stato possibile impostare uno studio di correlazione per questi indici.

A livello prossimale, in corrispondenza della spalla, i parametri hanno mostrato una maggior dispersione per punteggi più alti; per il giunto associato alla rotazione verticale la mediana mostra una minima sensibilità al valore delle valutazioni cliniche, ma in maniera assolutamente non significativa.

La dispersione dei dati, in generale indicativa di una scarsa ripetibilità delle misure, potrebbe in questo caso denotare una maggior capacità da parte dei soggetti di utilizzare l' articolazione di spalla per lo svolgimento degli esercizi; l' impossibilità di ricorrere selettivamente ai segmenti distali (per via del blocco sui giunti adottato dal personale) interviene a sostegno di questa ipotesi.

4.1.2 Indici di smoothness

I descrittori di velocità massima e velocità media non evidenziano alcuna capacità di discriminare i soggetti in funzione dello stato clinico, valutato tramite scala Wolf. Osservando l' andamento dei valori calcolati per il rapporto tra velocità media e massima, si nota una riduzione della dispersione dei dati in corrispondenza di punteggi più alti mentre le mediane rimangono confinate in un ristretto intervallo di valori; questo fenomeno potrebbe indicare una efficacia superiore del paradigma motorio sviluppato da questi soggetti, in grado di garantire una maggior ripetibilità delle performance durante lo svolgimento degli esercizi.

Un discorso analogo può essere fatto per il parametro *hand path ratio*: le mediane non sembrano mostrare cambiamenti statisticamente significativi, ma la riduzione della dispersione in corrispondenza di valutazioni migliori suggerisce anche in questo caso una maggior abilità nel controllo attivo da parte dei soggetti e la loro capacità di riprodurre in maniera fedele dei pattern motori funzionali.

Gli altri descrittori biomeccanici pensati per quantificare l' accuratezza dei gesti motori si sono dimostrati inadatti al fine della classificazione dello stato dei pazienti, e non hanno presentato caratteristiche degne di nota.

4.1.3 Indici di pressione sull' end-point

Come è stato già detto nel precedente capitolo, gli indici relativi al sensore di pressione sono apparsi privi di contenuto clinico rilevante.

Il risultato ottenuto è comunque in linea con le aspettative per l' esercizio considerato (*Cattura Verticale*), che non richiede l' azione di presa della mano da parte del soggetto. Può avere senso impostare uno studio per questa tipologia di parametri nello svolgimento di prove a cui siano associati gesti di *grasp-and-release*.

4.2 Conclusioni

In definitiva, nessuno dei descrittori biomeccanici implementati si è dimostrato in grado di classificare lo stato clinico di un soggetto partecipante ad un programma di riabilitazione neuro-motoria mediata da robot, e valutato mediante la scala funzionale definita dal *Wolf Motor Function Test*.

Per interpretare correttamente questi risultati, è bene comunque fare alcune considerazioni. In primo luogo la scala clinica considerata è composta da 17 *items* che comprendono task funzionali, valutazioni della forza e l' analisi qualitativa da parte del terapeuta di compiti più complessi e articolati; inoltre i punteggi utilizzati per lo studio sono stati assegnati da due diversi valutatori, e questo introduce nell' analisi una ulteriore fonte di incertezza (tipicamente associata alla soggettività della valutazione).

Per gli indici quantitativi invece è stato possibile utilizzare una sola modalità di esercizio, svolta nei diversi casi con una scelta non omogenea per le impostazioni delle prove, e ad ogni modo incapace di fornire un quadro valutativo completo e multifattoriale come il test funzionale Wolf.

Per di più lo svolgimento degli esercizi è avvenuto in condizioni non ideali, dato che il personale ha operato in più situazioni la scelta di vincolare i gradi di libertà del dispositivo privando di fatto lo studio di una significativa parte di contenuto informativo.

Una ulteriore limitazione per l' indagine svolta consiste nella quantità di dati disponibili per l' analisi; la natura retrospettiva dello studio unita all' assenza di una standardizzazione dei

Capitolo 4: Conclusioni

protocolli riabilitativi e valutativi ha messo a disposizione un set di soli 10 elementi per il campione, il che pregiudica l' affidabilità dei risultati ed ha impedito inoltre di impostare una analisi inferenziale rigorosa della correlazione tra valutazioni cliniche e quantitative.

Nonostante i numerosi limiti, alcuni degli indici sviluppati sembrano mostrare una qualche dipendenza dallo stato clinico dei pazienti sottoposti alle sessioni riabilitative. Alla luce delle osservazioni fatte, ed in virtù del crescente interesse in ambito medico-scientifico nel campo della valutazione quantitativa attraverso supporti meccanici alla terapia, sussistono i presupposti per la pianificazione di uno studio strutturato che indaghi le piene potenzialità messe a disposizione da un dispositivo come quello utilizzato.

La condizione alla base di uno studio futuro affine a quello presentato appare senza dubbio la standardizzazione del protocollo terapeutico in maniera rigorosa.

Si ritiene inoltre che un ulteriore contributo alle capacità diagnostiche dello strumento possa essere rappresentato dall' utilizzo di più tipologie di esercizi, con l' impiego di parametri biomeccanici costruiti 'ad hoc' sulle caratteristiche che le singole prove presentano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer DJ: *Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2009; 6-20.
- [2] Krebs HI, Hogan N, Aisen ML, Volpe BT: *Robot-aided neurorehabilitation*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering 1998; 6: 75-87.
- [3] Volpe BT, Krebs HI, Hogan N, Edelstein L, Diels C, Aisen M: *A novel approach to stroke rehabilitation: Robot-aided sensorimotor stimulation*. Neurology 2000; 54: 1938-44.
- [4] Reinkensmeyer DJ, Kahn LE, Averbuch M, McKenna-Cole A, Schmit BD, Rymer WZ: *Understanding and treating arm movement impairment after chronic brain injury: Progress with the ARM guide*. Journal of Rehabilitation Research and Development 2000; 37: 653-62.
- [5] Lum PS, Burgar CG, Shor PC, Majmundar M, Van der Loos M: *Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke*. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 2002; 83: 952-9.
- [6] Loureiro R, Amirabdollahian F, Topping M, Driesse B, Harwin W: *Upper limb robot mediated stroke therapy - GENTLE/s approach*. Autonomous Robots 2003; 15: 35-51.
- [7] Hesse S, Schulte-Tigges G, Konrad M, Bardeleben A, Werner C: *Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects*. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 2003; 84: 915-20.
- [8] Sanchez RJ, Liu J, Rao S, et al.: *Automating arm movement training following severe stroke: Functional exercises with quantitative feedback in a gravity-reduced environment*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 2006; 14: 378-89.
- [9] Housman SJ, Scott KM, Reinkensmeyer DJ: *A randomized controlled trial of gravity-supported, computer-enhanced arm exercise for individuals with severe hemiparesis*. Neurorehabilitation and Neural Repair 2009; 23: 505-14.
- [10] Nef T, Mihelj M, Riener R. ARMin: *A robot for patient-cooperative arm therapy*. Medical & Biological Engineering & Computing 2007; 45: 887-900.

BIBLIOGRAFIA

- [11] Staubli P, Nef T, Klamroth-Marganska V, Riener R: *Effects of intensive arm training with the rehabilitation robot ARMin II in chronic stroke patients: Four single-cases*. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation 2009; 6: 46.
- [12] Kowalczewski J, Chong SL, Galea M, Prochazka A: *In-home tele-rehabilitation improves tetraplegic hand function*. Neurorehabilitation and Neural Repair, E-pub ahead of print.
- [13] Faran S, Einav O, Yoeli D, Kerzhner M, Geva D, Magnazi G, van Kaick S, Mauritz KH: *Reo assessment to guide the ReoGo Therapy: Reliability and validity of novel robotic scores*. Inst. for Med. Psychol. & Behavioral Neurobiol., Univ. of Tubingen, Tubingen, Germany.
- [14] Krebs HI, Volpe BT, Ferraro M, et al.: *Robot-aided neurorehabilitation: From evidence-based to science-based rehabilitation*. Topics in Stroke Rehabilitation 2002; 8: 54-70.
- [15] Rohrer B, Fasoli S, Krebs HI, et al.: *Movement smoothness changes during stroke recovery*. The Journal of Neuroscience 2002; 22: 8297-304.
- [16] Chang JJ, Yang YS, Wu WL, Guo LY, Su FC: *The constructs of kinematic measures for reaching performance in stroke patients*. Journal of Medical and Biological Engineering 2008; 28: 65-70.
- [17] Colombo R, Pisano F, Micera S, et al.: *Assessing mechanisms of recovery during robot-aided neurorehabilitation of the upper limb*. Neurorehabilitation and Neural Repair 2008; 22: 50-63.
- [18] Bosecker C, Dipietro L, Volpe B, Krebs HI: *Kinematic robot-based evaluation scales and clinical counterparts to measure upper limb motor performance in patients with chronic stroke*. Neurorehabilitation and Neural Repair 2010; 24: 62-9.
- [19] Celik O, O'Malley MK, Boake C, Levin H, Yozbatiran N, Reistetter T: *Normalized movement quality measures for therapeutic robots strongly correlate with clinical motor impairment measures*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 2010; 18: 433-444.

- [20] Sanchez RJ, Reinkensmeyer D, Shah P, Liu J, Rao S, Smith R, Cramer S, Rahman T, Bobrow J: *Monitoring functional arm movement for homebased therapy after stroke*. Proceedings of the 26th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society San Francisco, CA; 2004, 4787-4790.
- [21] Sanchez RJ, Liu J, Rao S, Shah P, Smith R, Rahman T, Cramer SC, Bobrow JE, Reinkensmeyer DJ: *Automating arm movement training following severe stroke: functional exercises with quantitative feedback in a gravityreduced environment*. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 2006, 14:378-389.
- [22] Gladstone DJ, Danells CJ, Black SE: *The Fugl-Meyer Assessment of Motor Recovery after Stroke: A Critical Review of Its Measurement Properties*. Neurorehabil Neural Repair Sep. 2002; vol. 16 no. 3: 232-240.
- [23] Jebsen NH, Taylor N, Trieschmann RB, Trotter MJ, Howeward LA: *An objective and standardized test of hand function*. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation 1969, 50(6):311-9.
- [24] Bovend' Eerd T, Dawes H, Johansen-Berg H, Wade DT: *Evaluation of the Modified Jebsen Test of Hand Function and the University of Maryland Arm Questionnaire for Stroke*. Clin Rehabil; March 2004 vol. 18 no. 2195-202.
- [25] Mathiowetz V, Weber K, Kashman N, Volland G: *Adult norms for the Nine Hole Peg Test of finger dexterity*. Occupational Therapy Journal of Research, Vol 5(1), Jan 1985, 24-38.
- [26] Uswatte G, Taub E, Morris D, Light K, Thompson PA: *The Motor Activity Log-28: Assessing daily use of the hemiparetic arm after stroke*. Neurology October 10, 2006; vol. 67 no. 7 1189-1194.
- [27] Mahoney FI, Barthel DW: *Functional evaluation: the Barthel Index*. Maryland State Medical Journal; 1965, 14: 61-5.
- [28] Morris DM, Uswatte G, Crago JE, Cook III EW, Taub E: *The Reliability of the Wolf Motor Function Test for Assessing Upper Extremity Function After Stroke*. Arch Phys Med Rehabil Vol 82, June 2001.

BIBLIOGRAFIA

- [29] Pandyan AD, Johnson GR, Price CIM, Curless RH, Barnes MP, Rodgers H: *A review of the properties and limitations of the Ashworth and modified Ashworth Scales as measures of spasticity*. Clin Rehabil; May 1999, vol. 13 no. 5373-383.
- [30] Haugh AB, Pandyan AD, Johnson GR: *A systematic review of the Tardieu Scale for the measurement of spasticity*. Disabil Rehabil, 2006 Aug 15; 28(15): 899-907.
- [31] Paternostro-Sluga T, Grim-Stieger M, Posch M, Schuhfried O, Vacariu G, Mittermaier C, Bittner C, Fialka-Moser V: *Reliability and Validity of the Medical Research Council (MRC) Scale and a Modified Scale for Testing Muscle Strength in Patients with Radial Palsy*. Journal of Rehabilitation Medicine, Vol. 40, No. 8, sep. 2008: 665-671.
- [32] Wu CY, Lin KC, Chen HC, Chen IH, Hong WH: *Effects of Modified Constraint-Induced Movement Therapy on Movement Kinematics and Daily Function in Patients With Stroke: A Kinematic Study of Motor Control Mechanisms*. Neurorehabil Neural Repair 2007 21: 460.
- [33] Frascarelli F, Masia L, Di Rosa G, Petrarca M, Cappa P, Castelli E: *Robot-mediated and Clinical Scales Evaluation After Upper Limb Botulinum Toxin Type A Injection in Children with Hemiplegia*. J Rehabil Med 2009; 41: 988–994.
- [34] Krabben T, Molier BI, Houwink A, Rietman JS, Buurke JH, Prange GB: *Circle drawing as evaluative movement task in stroke rehabilitation: an explorative study*. J Neuroeng Rehabil. 2011 Mar 24; 8:15.
- [35] Subramanian SK, Yamanaka J, Chilingaryan G, Levin MF: *Validity of movement pattern kinematics as measures of arm motor impairment poststroke*. Stroke 2010 Oct; 41(10): 2303-8.
- [36] Johnson MJ, Wang S, Bai P, Strachota E, Tchekanov G, Melbie J, McGuire J: *Bilateral assessment of functional tasks for robot-assisted therapy applications*. Med Biol Eng Comput, (2011) 49: 1157–1171.
- [37] Zollo L, Rossini L, Bravi M, Magrone G, Sterzi S, Guglielmenlli E: *Quantitative evaluation of upper-limb motor control in robot-aided rehabilitation*. Med Biol Eng Comput, (2011) 49: 1131–1144.

- [38] Kodek T, Munih M: *An identification technique for evaluating body segment parameters in the upper extremity from manipulator-hand contact forces and arm kinematics*. Clinical Biomechanics ,21 (2006): 710–716.
- [39] Palazzolo JJ, Ferraro M, Krebs HI, Lynch D, Volpe BT, Hogan N: *Stochastic Estimation of Arm Mechanical Impedance During Robotic Stroke Rehabilitation*. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2007 March ; 15(1): 94–103.
- [40] Bosecker C, Dipietro L, Volpe B, Krebs HI: *Kinematic robot-based evaluation scales and clinical counterparts to measure upper limb motor performance in patients with chronic stroke*. Neurorehabilitation and Neural Repair 2010; 24: 62-9.
- [41] Hogan N, Sternad D: *Sensitivity of Smoothness Measures to Movement Duration, Amplitude, and Arrests*. Journal of Motor Behavior, Vol. 41, No. 6, 2009.
- [42] Zariffa J, Kapadia N, Kramer JLK, Taylor P, Alizadeh-Meghbrazi M, Zivanovic V, Albisser U, Willms R, Townson A, Curt A, Popovic MR, Steeves JD: *Relationship between clinical assessments of function and measurements from an upper-limb robotic rehabilitation device in cervical spinal cord injury*. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2011 Dec 23.