

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria Biomedica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo e validazione di un modello cinematico multi-
segmento dell'arto superiore per microchirurgia di
Nerve Transfer**



**Politecnico
di Torino**

Relatori:
Laura Gastaldi
Elisa Panero
Ugo Dimanico.

Candidata:
Agnese De Angelis
Matr 266593

Anno Accademico
2020/2021

“Sublimi feriam sidera vertice”

Orazio, Odi I, 1-36

Abstract

Tetraplegia is a paralysis involving all four limbs and the trunk. It is the result of a cervical injury to the spine or head one. For the quadriplegic subjects, the recovery of movements, even if limited, is very important. The function of the upper limb function can be improved through the nerve transfer surgery, which consists of transferring nerves from a healthy muscle, called donator and located upstream of the spinal cord injury, to recipient muscle that no longer has nerves following the injury. If the surgery is successful, patient can recover motor and sensory control of the affected area.

In this thesis it was examined the nerve transfers to the motor nerve of the triceps and to the posterior and anterior interosseous nerve to obtain the extension of the elbow and the phalanges of the fingers; currently, the post-operative evaluation is purely clinical.

This thesis project aims to develop a kinematic model of the upper limb and hand composed of 9 anatomical segments, described by 29 markers applied on specific anatomical landmarks, to evaluate the range of motion of the joints and to quantify the movement recovery after surgery and rehabilitation. Each segment is associated with a local anatomical reference system: the origins of the arm, of the forearm and of the hand are placed on the joint's center; the origin of the fingers is the metacarpophalangeal and the trunk origin is the marker of the clavicle.

The principal z-axis is taken parallel to the longitudinal direction of the segment; the x-axis identifies the antero-posterior direction and the y axis identifies the medio-lateral direction.

The experimental analyzes, carried out on 3 healthy female subjects, were performed at the laboratory of the Unipolar Spinal Unit in Turin using the Vicon optoelectronic system (8 IR cameras, of which 6 placed along the perimeter of the laboratory and 2 on tripods to restrict the capture volume, and 2 HD cameras).

The subjects involved two categories of movements. The first one includes: extra rotation of the shoulder, flexion-extension of the elbow, prono-supination of the forearm, the extension of the fingers and the flexion-extension of the thumb and index to analyze the range of movement of the joints involved and to verify the correct functioning of the model created. The second category reproduces the recipient and donor muscle movements, such as extra shoulder rotation combined with elbow extension, forearm pronation-supination associated with finger extension and elbow flexion associated with pinch to quantify any post-operative recovery.

The joint angles, expressed as Cardan angles between the proximal and distal segments of the joint, using the token YXZ as the Euler extraction order, were calculated for each movement and compared with the physiological ranges obtained from the studies of literature. The outputs graphs verify the

validity of the model. The future goal of this study will be to apply the model developed to quadriplegic patients after the nerve transfer operation to evaluate and quantify their eventual post-surgery recovery.

Abstract

La tetraplegia è una paralisi che coinvolge tutti e quattro gli arti ed il tronco. Essa è normalmente conseguenza di una lesione a livello cervicale della spina dorsale o di un trauma cranico. Nei soggetti tetraplegici il recupero di movimenti, pur se limitati, risulta molto importante.

È possibile recuperare alcune funzionalità dell'arto superiore mediante l'operazione di "nerve transfer", che consiste nel trasferire nervi di un muscolo sano, situato a monte della lesione midollare e chiamato donatore, a un muscolo ricevente che in seguito alla lesione non presenta più nervi funzionanti. Il paziente, se l'esito dell'intervento è positivo, ha la possibilità di recuperare il controllo motorio e sensoriale della zona interessata. In questa tesi si sono esaminati i trasferimenti nervosi al nervo motorio del tricipite e al nervo interosseo posteriore e anteriore per recuperare l'estensione del gomito e delle falangi delle dita; attualmente la valutazione post operatoria è prettamente clinica.

Il presente progetto di tesi si propone di sviluppare un modello cinematico dell'arto superiore e della mano composto da 9 segmenti anatomici, descritti da 29 markers applicati su appositi punti di repere anatomici, per valutare il range di movimento delle articolazioni e per quantificare il recupero del movimento post intervento. Ad ogni segmento è associato un sistema di riferimento anatomico locale: l'origine, nel braccio, nell'avambraccio e nella mano coincide con il centro dell'articolazione, nelle dita della mano con l'articolazione metacarpo- falangea e nel tronco con il marker posizionato sulla clavicola. L'asse z della terna è parallelo alla direzione longitudinale del segmento; l'asse x identifica la direzione antero-posteriore, e infine l'asse y identifica la direzione medio-laterale.

Le analisi sperimentali, effettuate su 3 soggetti sani di genere femminile, sono state eseguite presso il laboratorio del passo dell'Unità Spinale Unipolare di Torino, utilizzando il sistema optoelettronico Vicon (8 telecamere IR, di cui 6 poste lungo il perimetro del laboratorio e 2 su treppiedi così da restringere il volume di cattura, e 2 telecamere HD). I soggetti coinvolti hanno effettuato due categorie di movimenti. Nella prima si ha l'extrarotazione di spalla, la flessione-estensione di gomito, la prono-supinazione dell'avambraccio, l'estensione delle dita e la flessione-estensione del pollice e dell'indice con l'obiettivo di analizzare il range di movimento delle articolazioni coinvolte e di verificare il corretto funzionamento del modello creato. La seconda categoria riproduce i movimenti del muscolo ricevente e del donatore, come l'extrarotazione di spalla unita all'estensione di gomito, la prono-supinazione dell'avambraccio associata all'estensione delle dita e la flessione del gomito associata al movimento di pinza delle dita con il fine di quantificare un eventuale recupero post-operatorio.

Gli angoli articolari, ottenuti dal confronto tra l'orientamento relativo del segmento distale rispetto a quello prossimale dell'articolazione ed espressi come angoli di Eulero con rotazione YXZ, sono stati calcolati per ogni movimento e confrontati con i range fisiologici ricavati dallo studio della letteratura. I risultati ottenuti hanno consentito di verificare la validità del modello. L'obiettivo futuro è l'applicazione del modello sviluppato a pazienti tetraplegici per valutare e quantificare un loro eventuale recupero post intervento.

parole chiave: nerve transfer, modello cinematico, sistema di riferimento locale, angoli articolari, sistema optoelettronico

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	11
INDICE DELLE TABELLE.....	14
1 INTRODUZIONE.....	- 1 -
2 L'ANATOMIA DELL'ARTO SUPERIORE	- 3 -
2.1 L'ARTO SUPERIORE	- 3 -
2.1.1 BIOMECCANICA DELLA SPALLA	- 4 -
2.1.2 BIOMECCANICA DEL GOMITO.....	- 10 -
2.1.3 I PRINCIPALI MUSCOLI DELL'ARTO SUPERIORE	- 15 -
2.2 LA MANO	- 37 -
2.2.1 I MUSCOLI DELLA MANO	- 50 -
3 IL NERVE TRANSFER	- 53 -
3.1 LA TETRAPLEGIA E IL NERVE TRANSFER.....	- 53 -
3.2 TIPOLOGIE DI NERVE TRANSFER	- 57 -
4 MODELLI BIOMECCANICI DELLA MANO.....	- 73 -
4.1 MODELLI BIOMECCANICI IN LETTERATURA.....	- 73 -
4.1.1 "MODEL-BASED ANALYSIS OF HAND POSTURE" (LEE AND KUNII, 1995) [37]	- 74 -
4.1.2 "THREE-DIMENSIONAL ROTATIONS OF HUMAN THREE-JOINT FINGERS: AN OPTOELECTRONIC MEASUREMENT. PRELIMINARY RESULT" (DEGEORGES, PARASIE, MITTON, IMBERT, GOUBIER E LAVASTE, 2005) [39].....	- 75 -
4.1.3 "FINGER KINEMATIC MODELING AND REAL-TIME HAND MOTION ESTIMATION" (CERVERI, DE MOMI, LOPOMO, BAUD-BOVY, BARROS E FERRIGNO, 2007) [40]	- 78 -
4.1.4 "MULTI-FINGER COORDINATION IN HEALTHY SUBJECTS AND STROKE PATIENTS: A MATHEMATICAL MODELLING APPROACH" (CARPINELLA, JONSDOTTIR E FERRARIN, 2011) [41]	- 80 -
4.1.5 "COLLECTION AND ANALYSIS OF HUMAN UPPER LIMBS MOTION FEATURES FOR COLLABORATIVE ROBOTIC APPLICATIONS" (DIGO, ANTONELLI, CORNAGLIOTTO, PASTORELLI E GASTALDI, 2020) [42]	- 83 -
5 SISTEMI OPTOTOELETTRONICI.....	- 90 -
5.1 HARDWARE	- 92 -
5.2 I SOFTWARE	- 98 -
5.2.1 VICON NEXUS.....	- 99 -
5.2.2 VICON PROCALC.....	- 100 -
6 SVILUPPO DEL MODELLO.....	- 104 -
6.1 MODELLI PREESISTENTI IN VICON NEXUS.....	- 104 -
6.2 SVILUPPO DI UN NUOVO MODELLO	- 111 -

6.2.1	ACQUISIZIONE E ANALISI DELLA PROVA STATICA	- 115 -
6.2.2	DEFINIZIONE DELLA CINEMATICA DEI SEGMENTI ANATOMICI IN PROCALC	- 121 -
7	<u>PROVE SPERIMENTALI.....</u>	- 128 -
7.1	STRUMENTAZIONE E SOGGETTI	- 128 -
7.2	TASK DI MOVIMENTO	- 129 -
7.3	ANALISI DEI RISULTATI	- 140 -
7.4	RISULTATI E DISCUSSIONI	- 141 -
8	<u>CONCLUSIONI</u>	- 168 -
9	<u>RINGRAZIAMENTI</u>	- 170 -
10	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	- 172 -

Indice delle figure

FIGURA 2.1 ARTO SUPERIORE [1].....	- 3 -
FIGURA 2.2 ASSI DELLA SPALLA (A) [2] E PIANI ANATOMICI DEL CORPO (B) [3].....	- 4 -
FIGURA 2.3 COMPLESSO ARTICOLARE DI SPALLA [4, 5]	- 6 -
FIGURA 2.4 ESTENSIONE E FLESSIONE [6]	- 7 -
FIGURA 2.5 ADDUZIONE COMBINATA A RETROPOSIZIONE E AD ANTEPOSIZIONE [6]	- 7 -
FIGURA 2.6 ABDUZIONE DALLA POSIZIONE DI RIFERIMENTO ALLA POSIZIONE MASSIMA DI 180° [6]	- 8 -
FIGURA 2.7 ROTAZIONE ASSIALE [6].....	- 9 -
FIGURA 2.8 ARTICOLAZIONE DI GOMITO SUPERIORE [1]	- 10 -
FIGURA 2.9 LEGAMENTI DELL'ARTICOLAZIONE DI GOMITO [7]	- 11 -
FIGURA 2.10 (A) AMPIEZZA DELLA FLESSIONE ATTIVA; (B) FLESSIONE; (C) POSIZIONE DI RIFERIMENTO COINCIDENTE CON L'ESTENSIONE. [6].....	- 12 -
FIGURA 2.11 FENOMENO DEL CARRYING ANGLE [8]	- 13 -
FIGURA 2.12 VEDUTA LATERALE DEL MUSCOLO INTRINSECO DELTOIDE [11].....	- 16 -
FIGURA 2.13 INSERZIONE DEI MUSCOLI DELLA CUFFIA DEI ROTATORI [11].....	- 16 -
FIGURA 2.14 MUSCOLI DELLA CUFFIA DEI ROTATORI [1]	- 17 -
FIGURA 2.15 MUSCOLO DENTATO ANTERIORE [12]	- 18 -
FIGURA 2.16 MUSCOLO SUCCLAVIO [13].....	- 18 -
FIGURA 2.17 MUSCOLO GRANDE DORSALE [13]	- 19 -
FIGURA 2.18 MUSCOLO ELEVATORE DI SPALLA [13].....	- 20 -
FIGURA 2.19 GRANDE E PICCOLO ROMBOIDE [13].....	- 21 -
FIGURA 2.20 MUSCOLO TRAPEZIO ROMBOIDE [13].....	- 22 -
FIGURA 2.21 BICIPITE BRACHIALE [1]	- 25 -
FIGURA 2.22 MUSCOLO BRACHIALE [1]	- 26 -
FIGURA 2.23 MUSCOLO CORACOBRACHIALE [1]	- 26 -
FIGURA 2.24 TRICIPITE BRACHIALE [1]	- 27 -
FIGURA 2.25 MUSCOLI DELLO STRATO SUPERFICIALE E INTERMEDIO DELLA LOGGIA ANTERIORE DELL'AVAMBRACCIO [1].....	- 30 -
FIGURA 2.26 MUSCOLI DELLO STRATO INTERMEDIO E PROFONDO DELLA LOGGIA ANTERIORE DELL'AVAMBRACCIO [1]	- 31 -
-	
FIGURA 2.27 MUSCOLI DELLO STRATO SUPERFICIALE(A) E PROFONDO (B) DELLA LOGGIA POSTERIORE DELL'AVAMBRACCIO [1].....	- 33 -
FIGURA 2.28 STRUTTURA OSSEA DELLA MANO SUPERIORE [1]	- 37 -
FIGURA 2.29 PIANI E DIREZIONI DELLA MANO [6]	- 39 -
FIGURA 2.30 FLESSO-ESTENSIONE E POSIZIONE DI RIFERIMENTO DEL POLSO [6].....	- 40 -
FIGURA 2.31 ABDUZIONE, POSIZIONE DI RIFERIMENTO E ADDUZIONE DEL POLSO [6].....	- 41 -
FIGURA 2.32 MOVIMENTO DI PRONO-SUPINAZIONE [6].....	- 42 -
FIGURA 2.33 MOVIMENTI DI FLESSO-ESTENSIONE (B E C) E ABDUZIONE-ADDUZIONE (B E C) DELL'ARTICOLAZIONE TRAPEZIO -METACARPICA DEL POLLICE [6].	- 43 -
FIGURA 2.34 AMPIEZZA (A) DELLA FLESSIONE, (B) DELL'ESTENSIONE ATTIVA E (C) DELL'ESTENSIONE PASSIVA DELL'ARTICOLAZIONE METACARPO-FALANGEA [6].....	- 44 -
FIGURA 2.35 MOVIMENTI DI LATERALITÀ DURANTE L'ESTENSIONE (A) E LA FLESSIONE (B) DELL'ARTICOLAZIONE METACARPO-FALANGEA [6].	- 44 -
FIGURA 2.36 (A) MOVIMENTI DI LATERALITÀ DELL'INDICE, (B) CONO DI CIRCONDUZIONE, (C) ROTAZIONE ASSIALE INTERNA E (D) ROTAZIONE ASSIALE ESTERNA [6]	- 45 -
FIGURA 2.37 FLESSIONE (A), ROTAZIONE ASSIALE (B) ED ESTENSIONE(C) DELL'ARTICOLAZIONE METACARPO-FALANGEA DEL POLLICE [6]..	- 46 -
FIGURA 2.38 (A) FLESSIONE NELLE ARTICOLAZIONI INTER-FALANGEE PROSSIMALI E DISTALI, (B) ESTENSIONE ATTIVA DELL'INTERFALANGEE PROSSIMALI P E DISTALI D [6].	- 47 -
FIGURA 2.39 ESTENSIONE PASSIVA DELL'INTERFALANGEA PROSSIMALE (P) E DISTALE (D) [6].	- 47 -
FIGURA 2.40 (A) FLESSIONE, (B) ESTENSIONE ATTIVA E (C) ESTENSIONE PASSIVA DELL'ARTICOLAZIONE INTERFALANGEA DEL POLLICE [6]	- 48 -
FIGURA 2.41 MUSCOLI DELLA MANO [14]	- 52 -
FIGURA 3.1 LE FASI DELL'INTERVENTO: VIENE PRELEVATO UN NERVO SANO CHE VIENE USATO PER FARE DA PONTE TRA LA SEZIONE DI NERVO DANNEGGIATA E IL MUSCOLO PARALIZZATO. [19].....	- 56 -
FIGURA 3.2 NERVE TRANSFER PICCOLO ROTONDO PRO TRICIPITE [31].....	- 59 -

FIGURA 3.3 NERVO ASCELLARE, RADIALE, INTEROSSEO POSTERIORE CON I RISPETTIVI MUSCOLI INNERVATI [32].....	- 60 -
FIGURA 3.4 NERVE TRANSFER SUPINATORE PRO INTEROSSEO POSTERIORE [31].....	- 60 -
FIGURA 3.5 NERVO MEDIANO, NERVO INTEROSSEO ANTERIORE CON I RISPETTIVI MUSCOLI INNERVATI [32].....	- 61 -
FIGURA 3.6 (1) INCISIONE; (2) IDENTIFICAZIONE DEL NERVO MUSCOLOCUTANEO (FRECCIA VERDE), DEL NERVO MEDIALE (FRECCIA BLU) E DEL NERVO ANTEBRACHIALE LATERALE (FRECCIA GIALLA); (3) TRASFERIMENTO DEL NERVO MUSCOLOCUTANEO DEL BRACHIALE AL GRUPPO POSTERIORE DEL NERVO MEDIALE PER RICOSTRUIRE LA FLESSIONE DELLE DITA; (4) ANASTOMOSI DEI DUE NERVI. [33]	- 62 -
FIGURA 3.7 MOVIMENTO DI EXTRAROTAZIONE DI SPALLA NEL SUO ROM	- 66 -
FIGURA 3.8 MOVIMENTO DONATORE (EXTRAROTAZIONE DI SPALLA) ASSOCIATO AL MOVIMENTO DEL RICEVENTE (ESTENSIONE GOMITO) SENZA RESISTENZA.....	- 67 -
FIGURA 3.9 MOVIMENTO DONATORE (EXTRAROTAZIONE DI SPALLA) ASSOCIATO AL MOVIMENTO DEL RICEVENTE (ESTENSIONE GOMITO) CONTRO RESISTENZA.....	- 67 -
FIGURA 3.10 MOVIMENTO DI FLESSIONE DEL GOMITO NEL SUO ROM	- 68 -
FIGURA 3.12 MOVIMENTO DONATORE (FLESSIONE GOMITO) ASSOCIATO AL MOVIMENTO DEL RICEVENTE (FLESSIONE I E II DITO).....	- 68 -
FIGURA 3.13 MOVIMENTO DI SUPINAZIONE DEL BRACCIO NEL SUO ROM	- 69 -
FIGURA 3.13 MOVIMENTO DI SUPINAZIONE DEL BRACCIO ASSOCIATO ALL'ESTENSIONE DELLE DITA.....	- 69 -
FIGURA 3.14 ITER DEL PAZIENTE	- 70 -
FIGURA 4.1 (A) MODELLO CINEMATICO DELLA MANO, (B) SISTEMA DI RIFERIMENTO LOCALE PER LE DITA E PER IL POLLICE [37].....	- 74 -
FIGURA 4.2 POSIZIONAMENTO DEI MARKER. [39]	- 76 -
FIGURA 4.3 ANALISI DELLE ROTAZIONI FALANGEE. LE ROTAZIONI $[x, y, z]$ RD T RELATIVE DEL SISTEMA DI COORDINATE DELL'UNITÀ OSSEA DISTALE (RD) SONO STATE CALCOLATE CON RIFERIMENTO ALLA POSIZIONE $[x, y, z]$ RP T DELL'UNITÀ OSSEA ADIACENTE E PROSSIMALE (RP) [39].....	- 77 -
FIGURA 4.4 MODELLO CINEMATICO DELLA MANO E PROTOCOLLO DI POSIZIONAMENTO DEI 24 MARKERS. QUATTRO MARKER, COLLEGATI RIGIDAMENTE SU UNA STRUTTURA BLOCCATA SUL POLSO, TENGONO CONTO DELLA TRASLAZIONE E DELL'ORIENTAMENTO GLOBALE DELLA MANO; OGNI DITO È DOTATO DI QUATTRO MARKER POSTI IN CORRISPONDENZA DELLE ARTICOLAZIONI. I QUATTRO MARKER IN CORRISPONDENZA DELLE ARTICOLAZIONI MCP CONSENTONO LA RICOSTRUZIONE DEL MOVIMENTO DEL PALMO [40].	- 78 -
FIGURA 4.5 ANDAMENTO DELLA FLESSO-ESTENSIONE DURANTE IL MOVIMENTO TIP TO TIP	- 80 -
FIGURA 4.6 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO LOCALE DELLA MANO [41]	- 81 -
FIGURA 4.7 ANGOLI ARTICOLARI E POSIZIONI DELLE MANI ALLA MASSIMA APERTURA DI QUATTRO SOGGETTI CON ICTUS [41].....	- 82 -
FIGURA 4.8 (A) IMU POSIZIONATO SUL BORDO DEL TAVOLO E DEFINIZIONE DEL SDR GLOBALE; (B) POSIZIONAMENTO DEI MARKERS E DEGLI IMUS SUL SOGGETTO [42]	- 84 -
FIGURA 4.9 DEFINIZIONE DEGLI ASSI DI RIFERIMENTO ANATOMICI LOCALI E TECNICI DEI TRE SEGMENTI COINVOLTI NEL MOVIMENTO: (A) AVAMBRACCIO, (B) BRACCIO E (C) TRONCO [42].....	- 85 -
FIGURA 5.1 AMBITI DI APPLICAZIONE DEL VICON NEXUS: (A) CLINICO, (B) SPORTIVO, (C) ANIMALE E (D) CINEMATOGRAFICO [43].....	- 90 -
FIGURA 5.2 TIPOLOGIE DI MoCAP OTTICA	- 91 -
FIGURA 5.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA STEREOFOTOGRAMMETRIA APPLICATO AI SISTEMI OTTICI [45]	- 92 -
FIGURA 5.4 TIPOLOGIE DI TELECAMERE A IR E HD VICON [43].....	- 93 -
FIGURA 5.5 DISPOSIZIONE TELECAMERE IR COME DESCRITTO NELL'ARTICOLO [48]	- 94 -
FIGURA 5.6 SET UP SPERIMENTALE: POSIZIONAMENTO TELECAMERE A IR ATTACCATE ALLE PARETI E SUI TREPPIEDI..	- 94 -
FIGURA 5.7 ACTIVE WAND [43]	- 95 -
FIGURA 5.8 VISUALIZZAZIONE DELLE TELECAMERE NEL SOFTWARE NEXUS [43]	- 95 -
FIGURA 5.9 REGOLAZIONE DEL FOCUS DELLA TELECAMERA IR [43]	- 96 -
FIGURA 5.10 MARKER ATTIVO CON RELATIVA UNITÀ DI CONNESSIONE [49]	- 97 -
FIGURA 5.11 MARKERS PASSIVI DI VARIE DIMENSIONI [50].....	- 97 -
FIGURA 5.12 FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA VICON.....	- 98 -
FIGURA 5.13 INTERFACCIA VICON NEXUS	- 99 -
FIGURA 5.14 INTERFACCIA UTENTE VICON PROCALC.....	- 101 -
FIGURA 5.15 PROCESSAMENTO DEGLI OUTPUT IN NEXUS	- 103 -
FIGURA 6.1 MARKER SET UPPER BODY DEL PLUG-IN GATE_VISTA FRONTALE E POSTERIORE. [51]	- 105 -
FIGURA 6.2 POSIZIONAMENTO DEI MARKERS SULLA TESTA [1].....	- 105 -
FIGURA 6.3 POSIZIONAMENTO DEI MARKERS SUL TORACE [1]	- 106 -
FIGURA 6.4 POSIZIONAMENTO DEI MARKERS SULL'ARTO SUPERIORE_AVAMBRACCIO SUPINATO [1]	- 107 -
FIGURA 6.5 POSIZIONAMENTO MARKER UPPER LIMB MODEL_VISTA FRONTALE E POSTERIORE [51] [5]	- 108 -

FIGURA 6.6 POSIZIONAMENTO MARKER SULL'ARTO SUPERIORE SECONDO L'UPPER LIMB MODEL_ [1]	- 109 -
FIGURA 6.7 POSIZIONAMENTO DEI MARKERS COME DESCRITTO DAL NUOVO MODELLO PROGETTATO: (A) POSIZIONAMENTO MARKERS FRONTALE, (B) POSIZIONAMENTO MARKERS POSTERIORE, (C) POSIZIONAMENTO MARKERS SUL SOGGETTO POSTO DI PROFILO	- 112 -
FIGURA 6.8 POSIZIONAMENTO DEI MARKERS SULLA MANO COME DESCRITTO DAL NUOVO MODELLO PROGETTATO...	- 113 -
FIGURA 6.9 RICOSTRUZIONE DELLA POSIZIONE DEI MARKERS NELLA PROVA STATICA	- 116 -
FIGURA 6.10 SELEZIONE DEI MARKERS PER LA CREAZIONE DEI SEGMENTI	- 117 -
FIGURA 6.11 VISUALIZZAZIONE DEL SEGMENTO GENERATO NEL VIEWER.....	- 117 -
FIGURA 6.12 ASSEGNAZIONE DEI NOMI DEL MODELLO AI MARKER DEI VARI SEGMENTI	- 118 -
FIGURA 6.13 DEFINIZIONE DEI VERI SEGMENTI ANATOMICI.....	- 118 -
FIGURA 6.14 COLLEGAMENTO DEI SEGMENTI ANATOMICI ATTRAVERSO I GIUNTI.....	- 120 -
FIGURA 6.15 ORIENTAZIONE DEGLI ASSI DEI SEGMENTI IN MODALITÀ SUBJECT VIEWER DI NEXUS	- 120 -
FIGURA 6.16 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DEL TRONCO.....	- 121 -
FIGURA 6.17 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DEL BRACCIO.....	- 122 -
FIGURA 6.18 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DELL'AVAMBRACCIO	- 123 -
FIGURA 6.19 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DELL'AVAMBRACCIO	- 124 -
FIGURA 6.20 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DELL'INDICE	- 124 -
FIGURA 6.21 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO DELL'INDICE	- 125 -
FIGURA 7.1 EXTRAROTAZIONE DI SPALLA	- 130 -
FIGURA 7.2 ESTENSIONE GOMITO PRO GRAVITÀ	- 131 -
FIGURA 7.3 ESTENSIONE GOMITO PIANO NEUTRO	- 131 -
FIGURA 7.4 ESTENSIONE DI GOMITO ANTI GRAVITÀ	- 132 -
FIGURA 7.5 FLESSIONE DI GOMITO.....	- 132 -
FIGURA 7.6 FLESSIONE ED ESTENSIONE COMBINATA DI INDICE E POLLICE.....	- 133 -
FIGURA 7.7 PRONO-SUPINAZIONE DELL'AVAMBRACCIO.....	ERRORE. IL SEGNALE NON È DEFINITO.
FIGURA 7.8 ESTENSIONE DELLE DITA DELLA MANO.....	- 134 -
FIGURA 7.9 EXTRAROTAZIONE DI SPALLA COMBINATA ALL'ESTENSIONE DI GOMITO	- 135 -
FIGURA 7.10 FLESSIONE DEL GOMITO COMBINATA AL MOVIMENTO DI PINZA	- 135 -
FIGURA 7.11 PRONO- SUPINAZIONE DELL'AVAMBRACCIO COMBINATA AL MOVIMENTO DI ESTENSIONE DELLE DITA DELLA MANO.	- 136 -
FIGURA 7.12 QUALITY TAB DELLA PROVA	- 137 -
FIGURA 7.13 FILL GAP EFFETTUATO ATTRAVERSO APOSITA PIPELINE.....	- 139 -
FIGURA 7.14 PIPELINE CUSTOM MADE PER IL FILTRAGGIO E L'ESPORTAZIONE DEI DATI IN MATLAB.....	- 140 -
FIGURA 7.15 STEP DI MOVIMENTO DURANTE LA PROVA DI ROTAZIONE	- 141 -
FIGURA 7.16 GRAFICO DI RoM DELLE PROVE DI ROTAZIONE DELLA SPALLA	- 142 -
FIGURA 7.17 ANDAMENTO DEL RoM DEGLI ANGOLI DI ABD-ADDUZIONE E FLESSO-ESTENSIONE DI SPALLA DURANTE LE DUE PROVE DI ROTAZIONE DI SPALLA	- 143 -
FIGURA 7.18 ANDAMENTO DELL'ANGOLO DI GOMITO DURANTE LA PROVA DI ROTAZIONE DI SPALLA	- 144 -
FIGURA 7.19 PROVE DI ESTENSIONE E DI FLESSO-ESTENSIONE EFFETTUATE	- 145 -
FIGURA 7.20 (A) ESTENSIONE ANTI GRAVITÀ, (B) ESTENSIONE PRO GRAVITÀ, (C) ESTENSIONE SU PIANO NEUTRO, (D) ESTENSIONE SU TAVOLINO.....	- 146 -
FIGURA 7.21 ANDAMENTO ANGOLO DELLA SPALLA LUNGO L'ASSE ANTERO-POSTERIORE, LUNGO L'ASSE TRASVERSALE E ATTORNO ALL'ASSE VERTICALE : (A) ESTENSIONE ANTI GRAVITÀ, (B) ESTENSIONE PRO GRAVITÀ, (C) ESTENSIONE PIANO NEUTRO, (D) ESTENSIONE SU TAVOLINO.....	- 149 -
FIGURA 7.22 ANDAMENTO DEGLI ANGOLI DI GOMITO E DI SPALLA DURANTE LA PROVA DI FLESSO-ESTENSIONE PRO GRAVITÀ: (A) ANGOLO DI GOMITO, (B) ANGOLO DI SPALLA LUNGO L'ASSE ANTERO-POSTERIORE, (C) ANGOLO SPALLA LUNGO L'ASSE TRASVERSALE, (D) ANGOLO DI SPALLA LUNGO L'ASSE VERTICALE	- 150 -
FIGURA 7.23 STEP DI MOVIMENTO DELLA PROVA COMBINATA	- 151 -
FIGURA 7.24 RoM DELLA FLESSO-ESTENSIONE DI SPALLA DURANTE IL MOVIMENTO COMBINATO EXTRAROTAZIONE-ESTENSIONE GOMITO	- 151 -
FIGURA 7.25 ANGOLO DI SPALLA DURANTE LA PROVA COMBINATA DI EXTRAROTAZIONE ED ESTENSIONE DEL GOMITO PRO GRAVITÀ: (A)ANGOLO DI SPALLA LUNGO L'ASSE ANTERO-POSTERIORE, (B) ANGOLO DI SPALLA LUNGO L'ASSE TRASVERSALE	- 152 -
FIGURA 7.26 STEP DI MOVIMENTO DELLA PROVA DI PRONO-SUPINAZIONE E ANDAMENTO DELL'ANGOLO AL POLSO ..	- 153 -
FIGURA 7.27 POSIZIONAMENTO DELLE TELECAMERE PER LE PROVE CON IL SOGGETTO S2 E S3	- 154 -

FIGURA 7.28 DISPOSIZIONE DEL SOGGETTO ALL'INTERNO DEL VOLUME DI CATTURA E TIPOLOGIE DI PROVE DIE STENSIONE CONDOTTE.....	- 155 -
FIGURA 7.29 RoM DELLA PROVA DI FLESSIONE PRO GRAVITÀ (A) E (B) E SU PIANO NEUTRO (C)	- 156 -
FIGURA 7.30 STEP DELLA PROVA E ANDAMENTO DELL'ANGOLO DI GOMITO DURANTE LA PROVA DI FLESSO ESTENSIONE ...	- 157 -
FIGURA 7.31 STEP DI MOVIMENTO DELLA PRONO SUPINAZIONE E ANDAMENTO DELL'ANGOLO DI POLSO E DI GOMITO DURANTE IL MOVIMENTO	- 158 -
FIGURA 7.32 STEP DI MOVIMENTO DELLA PRONAZIONE E ANDAMENTO DELL'ANGOLO AL GOMITO DURANTE LA PROVA.....	- 159 -
FIGURA 7.33 STEP DI MOVIMENTO E ANDAMENTO DELLA PROVA DI FLESSO-ESTENSIONE DELLE DITA	- 160 -
FIGURA 7.34 STEP DI MOVIMENTO E ANDAMENTO DEGLI ANGOLI DELLE DITA LUNGHE E DEL GOMITO DURANTE LA PROVA COMBINATA.....	- 161 -
FIGURA 7.35 STEP DI MOVIMENTO E ANDAMENTO DEGLI ANGOLI DELL'INDICE E DEL POLLICE LUNGHE DURANTE DI PINCH	- 163 -
FIGURA 7.36 STEP DI MOVIMENTO E ANGOLO AL GOMITO E DELL'INDICE OTTENUTI DALLA PROVA DI FLESSIONE DI GOMITO COMBINATA ALLA FLESSO-ESTENSIONE DEL DITO INDICE E DEL POLLICE.....	- 164 -
FIGURA 7.37 ANGOLO DEL POLLICE DURANTE IL MOVIMENTO DI PINCH COMBINATO ALLA FLESSO-ESTENSIONE DL GOMITO	- 165 -

Indice delle tabelle

TABELLA 1 GRADI DI LIBERTÀ DELLE ARTICOLAZIONI DELLA SPALLA E DEL GOMITO	- 14 -
TABELLA 2 TABELLA RIASSUNTIVA DEI MUSCOLI DELLA SPALLA	- 24 -
TABELLA 3 RIASSUNTO DEI MUSCOLI DEL BRACCIO	- 28 -
TABELLA 4 TABELLA RIASSUNTIVA DEI MUSCOLI DELL'AVAMBRACCIO	- 36 -
TABELLA 5 GRADI DI LIBERTÀ DELLE ARTICOLAZIONI DELLA MANO.....	- 49 -
TABELLA 6 CLASSIFICAZIONE DELLA FORZA MUSCOLARE.....	- 54 -
TABELLA 7 CLASSIFICAZIONE DELLA LESIONE IN BASE AL NUMERO DI MUSCOLI CHE RIMANGONO FUNZIONALI SOTTO IL GOMITO	- 55 -
TABELLA 8 TIPOLOGIE DI NERVE TRANSFER	- 58 -
TABELLA 9 MISURAZIONE DEGLI ANGOLI DI FLESSIONE ESTENSIONE, RADIO-ULNARI MASSIMI E DI ROTAZIONE ASSIALE LONGITUDINALE NELLE ARTICOLAZIONI MCP E PIP [39].....	- 77 -
TABELLA 10 VARIAZIONE DEL RoM NEI SOGGETTI SANI E IN QUELLI CON EMIPARESI [41]	- 82 -
TABELLA 11 RIASSUNTO DELL'ANALISI CONDOTTA IN LETTERATURA.....	- 89 -
TABELLA 12 OUTPUTS RICAVABILI DAL MODELLO UPPER BODY PLUG-IN GATE.....	- 108 -
TABELLA 13 OUTPUT RICAVABILI DAL MODELLO UPPER LIMB MODEL.....	- 110 -
TABELLA 14 TABELLA RIASSUNTIVA DEL POSIZIONAMENTO DEI MARKERS.....	- 115 -
TABELLA 15 OUTPUT RICAVABILI DAL MODELLO CUSTOM MADE.....	- 126 -
TABELLA 16 TABELLA CON DATI PERSONALI E MISURE ANTROPOMETRICHE DEI SOGGETTI.....	- 129 -
TABELLA 17 COMPONENTI DI SPALLA DURANTE LA PROVA DI FLESSO-ESTENSIONE DI GOMITO	- 146 -
TABELLA 18 ANGOLI DI FLESSIONE DELL' ARTICOLAZIONE METACARPO- FALANGEA NELLA POSIZIONE DI PARTENZA- 159 -	- 159 -
TABELLA 19 ANGOLO DI FLESSIONE DELL'ARTICOLAZIONE METACARPO-FALANGEA NELLA POSIZIONE INIZIALE DURANTE LA PROVA COMBINATA DI SUPINAZIONE + FLESSO-ESTENSIONE DITA	- 161 -
TABELLA 20 TABELLA RIASSUNTIVA DEI RoM DELLE PROVE.....	- 166 -

1 Introduzione

Il seguente lavoro di tesi si propone di sviluppare un modello cinematico dell'arto superiore e della mano multi-segmento per valutare il range di movimento delle articolazioni e per quantificare il recupero del movimento post intervento.

La tesi può essere suddivisa come segue:

- 1 Introduzione: descrizione dell'articolazione del lavoro svolto.
- 2 L'arto Superiore: in questo capitolo si è descritta l'anatomia e la biomeccanica dell'arto superiore, soffermandosi in maniera più dettagliata sulla mano.
- 3 Nerve Transfer: descrizione dell'intervento di nerve transfer soffermandosi sui soggetti candidati a questa operazione e sulle fasi di recupero post operatorio.
- 4 Modelli Biomeccanici della Mano: in questo capitolo si è descritta l'analisi in letteratura condotta con l'obiettivo di capire come modellizzare, da un punto di vista cinematico, la mano, di comprendere il corretto posizionamento dei marker sull'arto superiore, di come determinare il sistema di riferimento locale della mano.
- 5 Sistemi Optoelettronici: il capitolo descrive la tecnologia Vicon adoperata per lo svolgimento di questa tesi, distinguendo tra la parte hardware e software;
- 6 Sviluppo del Modello: descrizione degli steps che hanno portato alla creazione del modello cinematico dell'arto superiore e della mano.
- 7 Prove Sperimentali: applicazione del modello cinematico dell'arto superiore definendo i soggetti coinvolti nella prova, i tasks di movimento effettuati e la strumentazione utilizzata. Segue l'analisi e la discussione dei risultati.
- 8 Conclusioni: analisi del modello sviluppato con riferimento ai limiti del modello e a possibili applicazioni future.

2 L'anatomia dell'arto Superiore

In questo capitolo si descriverà l'anatomia e la biomeccanica dell'arto superiore, soffermandosi in maniera più dettagliata sulla mano. Si intende descrivere le strutture anatomiche maggiormente coinvolte (articolazioni, muscoli, legamenti) nei movimenti e nei gesti quotidiani, in modo da sottolineare l'anatomia e le principali funzioni, oltre ai range di movimento concessi dalle singole articolazioni presenti.

2.1 L'arto superiore

L'arto superiore è costituito da quattro parti fondamentali: la spalla, il braccio, l'avambraccio e la mano; essi si articolano tra loro attraverso tre complessi articolari: la spalla, il gomito e il polso (*figura 2.1*)

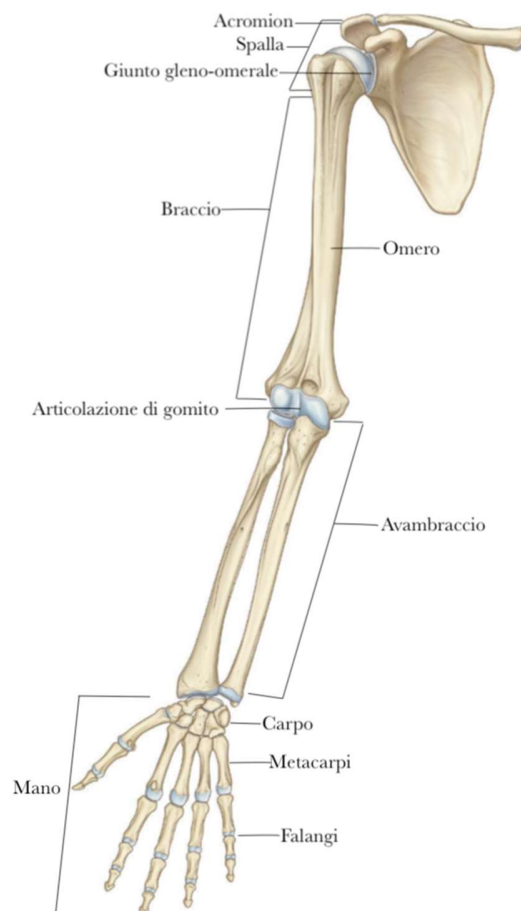


Figura 2.1 Arto superiore [1].

2.1.1 Biomeccanica della spalla

La spalla è l'articolazione che permette al braccio di articolarsi con il tronco; essa possiede tre gradi di libertà e tre assi principali, i quali consentono di orientare l'arto superiore nei tre piani dello spazio. Per queste caratteristiche la spalla è l'articolazione che consente maggiori gradi di libertà e range di movimento tra tutte le articolazioni presenti nel corpo umano.

- L'asse trasversale (1), situato nel piano frontale del corpo, consente il movimento di flessione (anteposizione) ed estensione (retroposizione) eseguiti nel piano sagittale.
- L'asse antero- posteriore (2), posto nel piano sagittale, permette i movimenti di abduzione e adduzione mediante i quali l'arto superiore rispettivamente si allontana o si avvicina dal piano di simmetria del corpo; i movimenti di abduzione e adduzione sono effettuati in un piano frontale.
- L'asse verticale (3) si determina intersecando il piano sagittale con quello frontale e comanda i movimenti di ante e retroposizione quando le braccia sono abdotte di 90°.

Esiste anche un quarto asse, detto *asse longitudinale dell'omero* (4), che consente la rotazione dell'arto superiore (figura 2.2). Viene definita la **posizione di riferimento**, la quale prevede che l'arto superiore sia disposto lungo il corpo in modo che l'asse longitudinale dell'omero corrisponda a quello verticale.

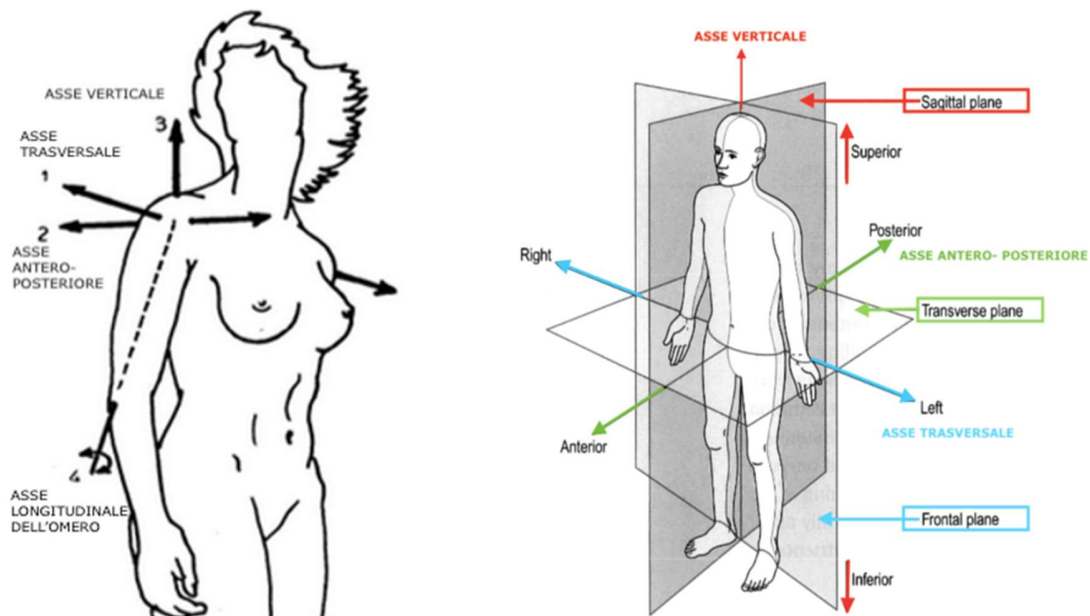


Figura 2.2 Assi della spalla (a) [2] e piani anatomici del corpo (b) [3]

L'articolazione di spalla a sua volta si compone di cinque articolazioni che costituiscono il complesso articolare della spalla, come mostrato in *figura 2.3*.

- **L'articolazione scapolo – omerale** è un'enartrosi¹ le cui superfici articolari emisferiche sono date dalla testa dell'omero e dalla cavità glenoidea della scapola, entrambe rivestite da cartilagine. È anche definita articolazione principale spalla in quanto consente all'omero un'ampia gamma di movimenti quali: flessione, estensione, abduzione, adduzione, rotazione e circonduzione.

I movimenti di flessione, estensione e adduzione sono piuttosto limitati; la rotazione può essere interna o esterna.

- **L'articolazione scapolo- toracica** è un piano di scivolamento muscolare che non può funzionare senza le precedenti articolazioni, che le sono legate meccanicamente, e consente il movimento di anteposizione e retroposizione del moncone di spalla. Inoltre contribuisce, insieme all'articolazione scapolo-omerale, alla generazione del movimento di anteposizione–adduzione anteriore e retroposizione-abduzione posteriore: l'ampiezza generale del movimento non raggiunge del tutto i 180°.

- **L'articolazione sotto-deltoidea o seconda articolazione di spalla** è meccanicamente associata all'articolazione scapolo – omerale in quanto ogni movimento della scapolo-omerale causa un movimento della sotto-deltoidea. Consente lo scorrimento tra l'estremità superiore dell'omero e la cuffia dei muscoli rotatori formata dal muscolo sopraspinato, dal sottospinato, dal piccolo rotondo e dal muscolo sottoscapolare.

- Le **articolazioni acromion - clavicolare** e **sterno – costo – clavicolare** sono situate all'estremità della clavicola, rispettivamente esternamente e internamente.

La prima connette la clavicola alla scapola ed è formata da due faccette ossee, rivestite da cartilagine, unite tra di loro mediante la capsula articolare a sua volta rinforzata dai legamenti acromio-clavicolari. È messa in movimento contemporaneamente all'articolazione sterno-

¹ Appartenente alla classe di articolazione mobile (diartrosi) e costituita da un capo articolare simile ad una sfera piena (testa) ospitato in una cavità articolare a forma di sfera cava. I movimenti si effettuano lungo tutti e tre gli assi fondamentali (sagittale, trasverso e verticale).

clavicolare per consentire movimenti di scorrimento tramite i quali la scapola modifica il proprio rapporto con il torace consentendo una più ampia libertà di movimenti al braccio. Oltre al movimento di scivolamento della clavicola, l'articolazione acromion-clavicolare consente una rotazione assiale di 30° della scapola.

L'articolazione sterno – costo - clavicolare è costituita da una superficie più piccola, la clavicolare, che si applica sulla superficie più grande che è la sterno - costale. Le superfici in questione presentano una doppia curvatura, concava e convessa. Per questo motivo questa articolazione è detta a forma di sella² e consente movimenti di flessione, estensione, abduzione, adduzione e una rotazione di circa 30° attorno all'asse maggiore della clavicola.

È tuttavia più probabile che, come tutte le articolazioni dotate di due gradi di libertà di movimento, l'articolazione sterno – costo - clavicolare determini una rotazione congiunta durante la rotazione attorno ai due assi. Questo è confermato dal fatto che questa rotazione longitudinale della clavicola avvenga sempre in presenza di un movimento di anteposizione– retroposizione o di abbassamento-anteposizione.

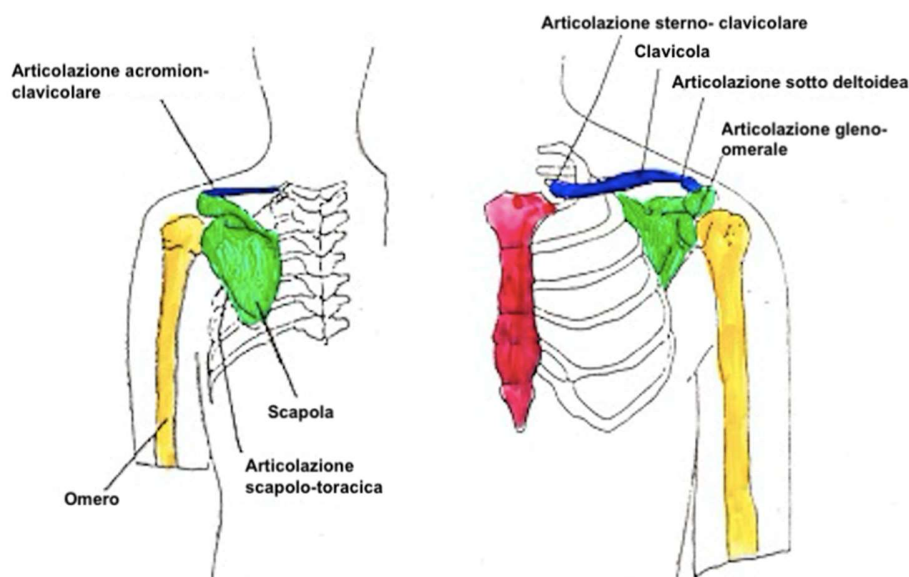


Figura 2.3 Complesso articolare di spalla [4, 5]

² Appartenente alla classe di articolazione mobile (diartrosi) e costituita da due superfici aventi ognuna due curvature, una concava e l'altra convessa: la superficie convessa di un osso si articola con la superficie concava dell'altro osso così da consentire un movimento rotatorio limitato.

Di seguito sono analizzati i movimenti consentiti dall'articolazione di spalla lungo i suoi vari assi e riportati i rispettivi valori di RoM³ espressi in gradi. (Kapandji, 1974)

I movimenti di **anteposizione (flessione)** e **retroposizione (estensione)** sono effettuati nel piano sagittale intorno all'asse trasversale (1): l'ampiezza massima della anteposizione è pari a 180° mentre quella di retroposizione è 45°-50° (figura 2.4)

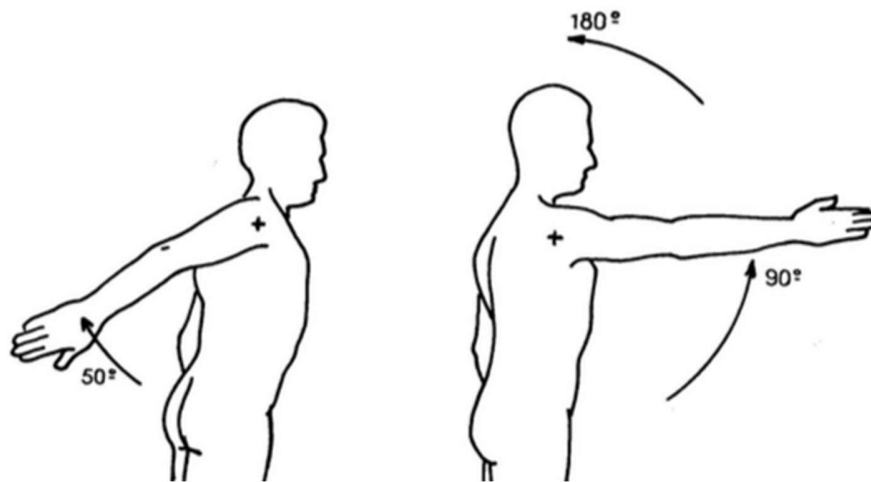


Figura 2.4 Estensione e flessione [6]

L'**adduzione** nel piano frontale, partendo dalla posizione di riferimento, è possibile solo se combinata alla retroposizione generando una adduzione molto limitata, o alla anteposizione che consente una adduzione di 30°- 45°. (figura 2.5)

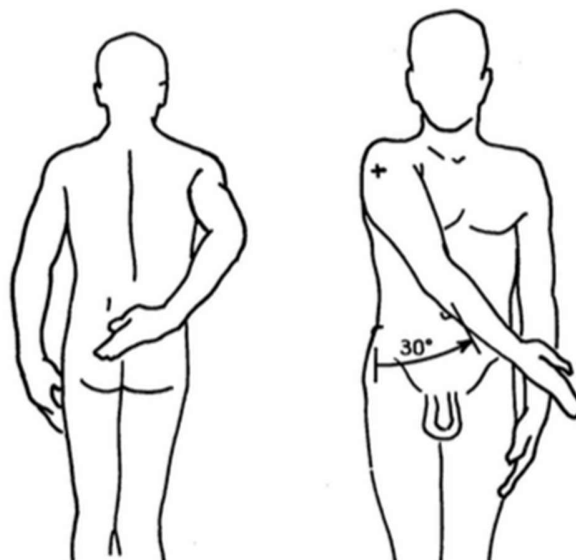


Figura 2.5 Adduzione combinata a retroposizione e ad anteposizione [6]

³ Ampiezza di movimento espressa in gradi che ogni articolazione può eseguire nello spazio.

L'**abduzione** è effettuata nel piano frontale attorno all'asse antero-posteriore (2) e partendo dalla posizione di riferimento raggiunge il valore di 180° mediante tre step di movimento ognuno di 60° , come mostrato in figura 2.6.

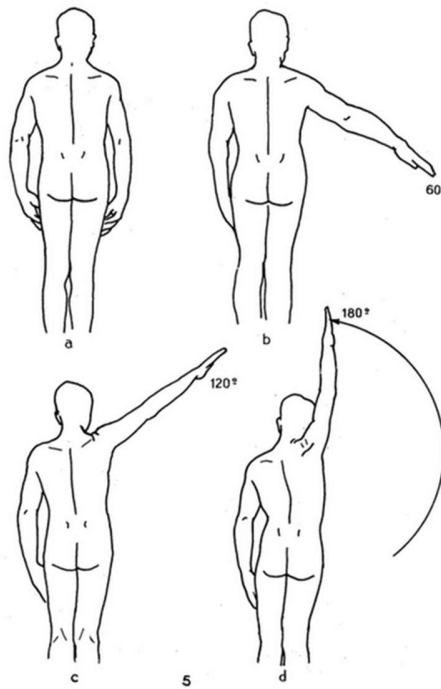


Figura 2.6 Abduzione dalla posizione di riferimento alla posizione massima di 180° [6]

La **rotazione** (figura 2.7) del braccio avviene intorno all'asse longitudinale dell'omero partendo dalla posizione di riferimento che prevede:

- una rotazione di partenza pari a 0° così da riuscire a misurare l'ampiezza dei movimenti di rotazione;
- il gomito flesso a 90° cosicché l'avambraccio sia situato nel piano sagittale. Ciò è necessario affinché all'ampiezza dei movimenti di rotazione non si aggiungano i movimenti di prono-supinazione dell'avambraccio.

Il movimento completo di rotazione si compone di due diverse tipologie di rotazioni: la rotazione esterna di ampiezza pari a 80° e la rotazione interna di ampiezza pari a 95° . Per ottenere questa ampiezza, occorre far passare il braccio dietro al tronco comportando un certo grado di retroposizione.

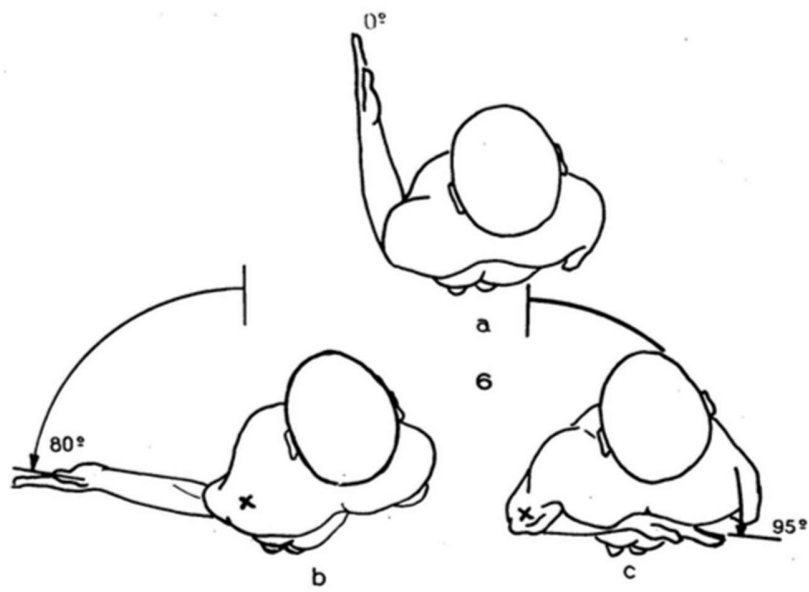


Figura 2.7 Rotazione assiale [6]

È possibile combinare i movimenti elementari intorno ai tre assi ottenendo il movimento di *circonduzione*.

2.1.2 Biomeccanica del gomito

Il gomito viene anche definito articolazione intermedia dell'arto superiore in quanto congiunge meccanicamente il braccio con l'avambraccio, consentendo all'avambraccio di portare più o meno lontano la mano e possiede due gradi di libertà.

Come mostrato in *figura 2.8*, l'articolazione di gomito è formata dalle estremità dell'omero, nel braccio, e di ulna e radio, nell'avambraccio. L'estremità dell'omero si articola in due parti, la troclea internamente e il capitello esternamente. La prima entra in contatto con l'ulna, mentre il secondo si articola con il radio.

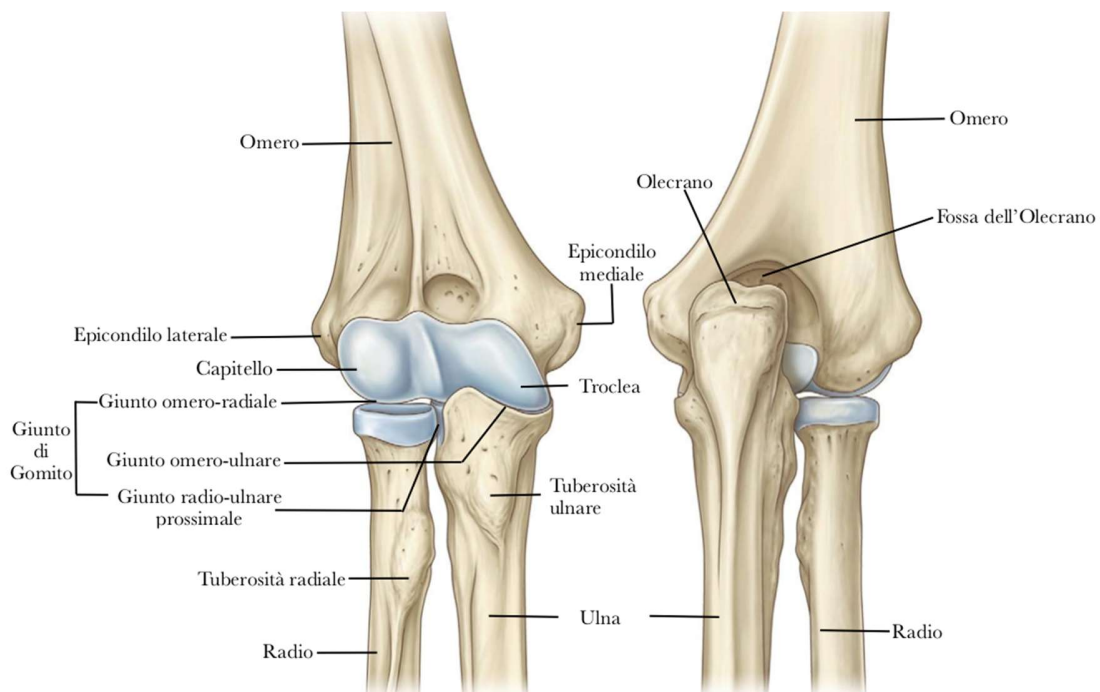


Figura 2.8 Articolazione di gomito superiore [1]

Nel gomito le superfici ossee sono ricoperte da un sottile strato di cartilagine. L'articolazione è circondata da una capsula, circondata da legamenti, che ha funzione rinforzante e lubrificante; il liquido prodotto dalla membrana sinoviale della capsula riempie gli spazi vuoti fra le ossa, riducendo le forze di attrito. I legamenti collaterali connettono e mantengono in posizione il radio e l'ulna, mentre il legamento anulare tiene unite le ossa dell'avambraccio. Nel loro insieme consentono i movimenti, evitando la lussazione dell'articolazione. (*figura 2.9*)

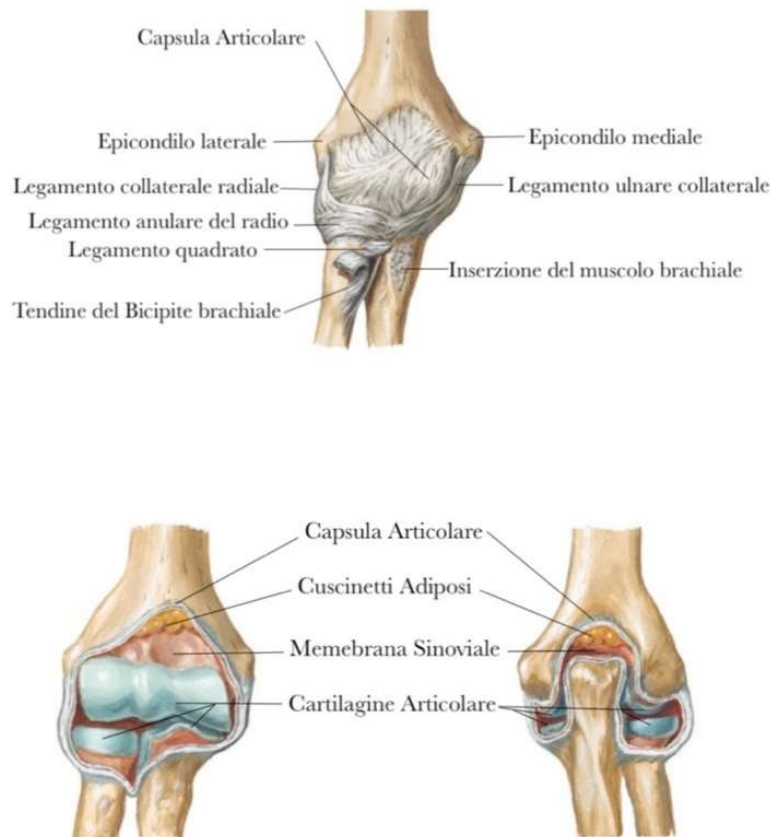


Figura 2.9 Legamenti dell'articolazione di gomito [7]

Di seguito sono analizzati i movimenti consentiti dall'articolazione di gomito lungo i suoi vari assi e riportati i rispettivi valori di RoM espressi in gradi. (Kapandji, 1974).

Da un punto di vista fisiologico è possibile distinguere due funzioni separate: la **flesso-estensione** che richiede l'attivazione sia dell'articolazione omero – ulnare sia di quella omero – radiale e la **prono-supinazione** che coinvolge l'articolazione radio - ulnare superiore, che appartiene anatomicamente all'articolazione del gomito, e l'articolazione radio - ulnare inferiore, che anatomicamente appartiene all'articolazione del polso; per questo motivo il movimento di prono-supinazione verrà trattato nel capitolo 2.2.

Viene definita, anche per il gomito, **una posizione di riferimento**, la quale prevede il braccio pendente lungo il corpo con il gomito leggermente flesso e con l'asse dell'avambraccio situato nel prolungamento dell'asse del braccio.

La flesso - estensione di gomito avviene attorno all'asse passante per il complesso condilo - trocleare. Si definisce **estensione** il movimento che porta l'avambraccio indietro; la posizione di riferimento corrisponde all'estensione completa: non esiste un'ampiezza di estensione del gomito tranne che nei bambini e nelle donne, i quali, possedendo una grande lassità legamentosa, possono iperestendere il gomito di 5-10° (Kapanji,1974). L'estensione relativa è sempre possibile a partire da qualsiasi posizione di flessione del gomito. La **flessione** è il movimento che porta l'avambraccio in avanti il braccio cosicché la faccia anteriore dell'avambraccio venga incontro alla faccia anteriore del braccio. Essa può essere *attiva* raggiungendo l'ampiezza di 145° o *passiva*, realizzata tramite una forza esterna, che può arrivare a 160° (Kapanji,1974). Il movimento di flesso-estensione di gomito è mostrato in *figura 2.10*.

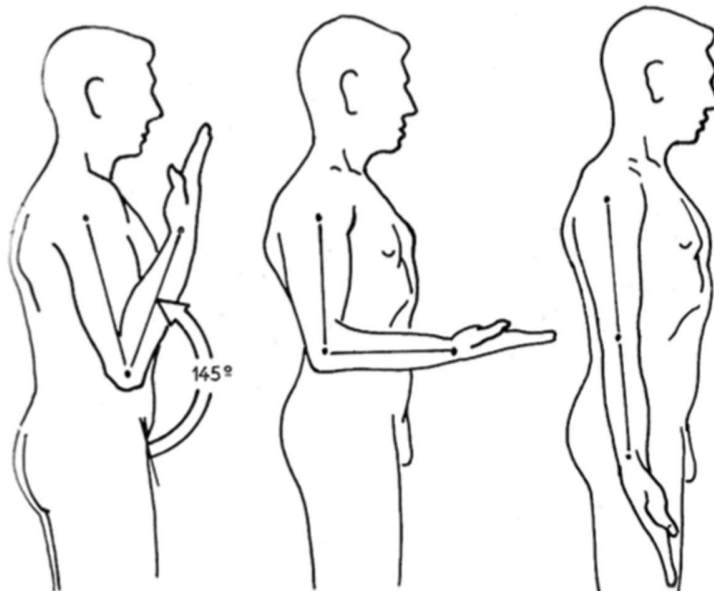


Figura 2.10 (a) Ampiezza della flessione attiva; (b) Flessione; (c) Posizione di riferimento coincidente con l'estensione. [6]

Gli assi longitudinali del braccio e dell'avambraccio non sono perfettamente in linea e in corrispondenza del gomito si incontrano descrivendo un angolo che in letteratura viene denominato (carrying angle o angolo funzionale del gomito) acuto verso l'esterno. Per il fenomeno del carrying angle il gomito risulta valgo in completa estensione e, ruotando progressivamente durante la flessione, varo in flessione. come mostrato in *figura 2.11*.

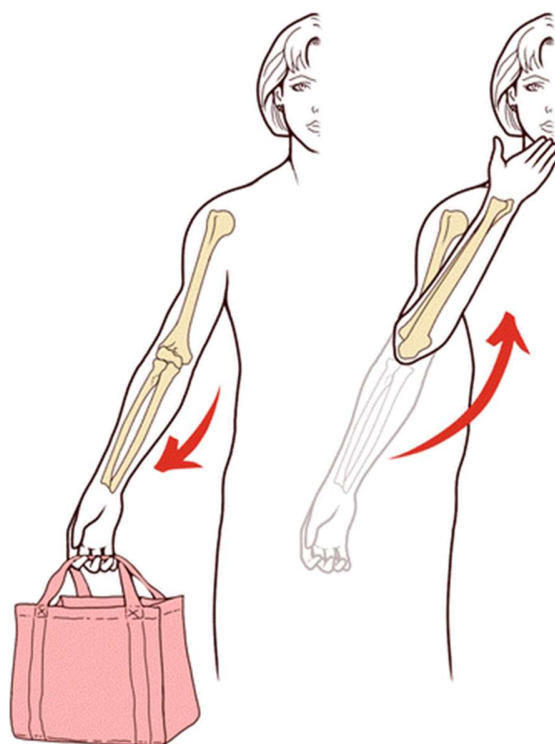


Figura 2.11 Fenomeno del carrying angle [8]

Gli studi riportati in letteratura hanno valutato il valore di questo angolo quando il gomito è perfettamente esteso e la mano supinata (posizione anatomica). I valori medi attribuiti al carrying angle sono compresi in un range variabile tra i 6.7° [9] e i 22.5° [10].

ARTICOLAZIONE	GDL	POSIZIONE DI RIFERIMENTO	MOVIMENTI CONSENTITI
SPALLA	3	POSIZIONE DI RIFERIMENTO DI FLESSO/ESTENSIONE E	–FLESSO/ESTENSIONE { F: 180° E: 50° –ABDUZIONE/ADDUZIONE AB: 180° effettuati mediante tre step di movimento ognuno di 60° AD+ESTENSIONE: movimento limitato

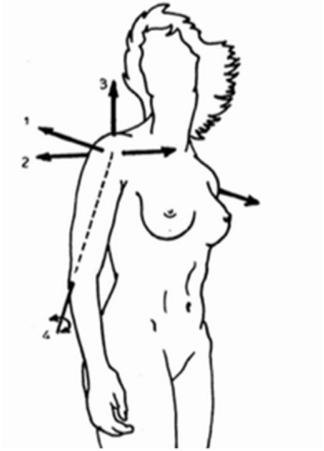
GOMITO		• <i>ABDUZIONE/ADDUZIONE</i> 	<i>AD+FLESSIONE: 30°-45°</i> <i>–ROTAZIONE</i> <i>EXTRAROTAZIONE: 80°</i> <i>INTRAROTAZIONE: 95°</i>
		• <i>POSIZIONE DI RIFERIMENTO PER LA ROTAZIONE</i> 	
	2		<i>–FLESSO/ESTENSIONE</i> <i>FLESSIONE: { ATTIVA 145° PASSIVA 160°</i> <i>ESTENSIONE ≡ POSIZIONE DI RIFERIMENTO</i> <i>Nel caso di donne e bambini esiste un'iperestensione di 5-10°</i> <i>–PRONO/SUPINAZIONE</i> <i>{ P: 90° S: 85°</i>

Tabella 1 Gradi di libertà delle articolazioni della spalla e del gomito

2.1.3 I principali muscoli dell'arto superiore

In questo sottocapitolo verranno analizzati i principali muscoli della spalla, del braccio e dell'avambraccio.

2.1.3.1 I muscoli della spalla

I muscoli della spalla possono essere classificati in due diversi gruppi: i *muscoli intrinseci*, le cui estremità si inseriscono direttamente sulle ossa costituenti la spalla e i *muscoli estrinseci*, le cui estremità sono una collegata a un osso della stessa spalla e una a un osso del tronco.

Il gruppo dei *muscoli intrinseci* è costituito da:

- **Deltoide** ricopre i muscoli della cuffia dei rotatori ed è costituito da tre diversi capi: il capo anteriore che si origina dalla porzione antero-superiore della clavicola, il capo laterale che parte dalla superficie superiore dell'acromion ed infine il capo posteriore che si origina dal margine posteriore della spina scapolare, processo osseo della superficie posteriore della scapola. Si inserisce sull'omero in corrispondenza della tuberosità deltoidea del corpo dell'omero e consente medialmente i movimenti di abduzione, flessione e rotazione del braccio e lateralmente solo l'estensione e la rotazione. (figura 2.11)

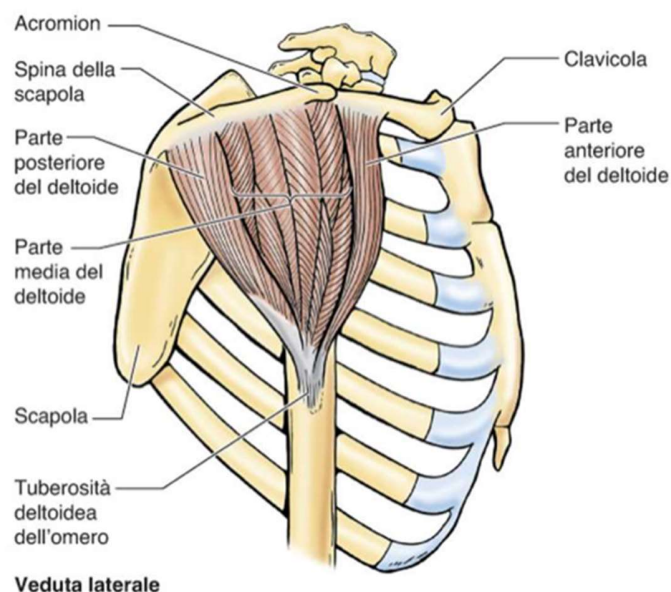


Figura 2.12 Veduta laterale del Muscolo intrinseco Deltoide [11]

- **Cuffia dei rotatori** è un gruppo di muscoli costituito dal muscolo sopraspinato, dal sottospinato, dal piccolo rotondo e dal sottoscapolare, che si originano dalla scapola e si inseriscono sul tubercolo maggiore e minore dell'omero (figura 2.12). Questo gruppo di muscoli contraendosi stabilizza la spalla impedendone la lussazione.

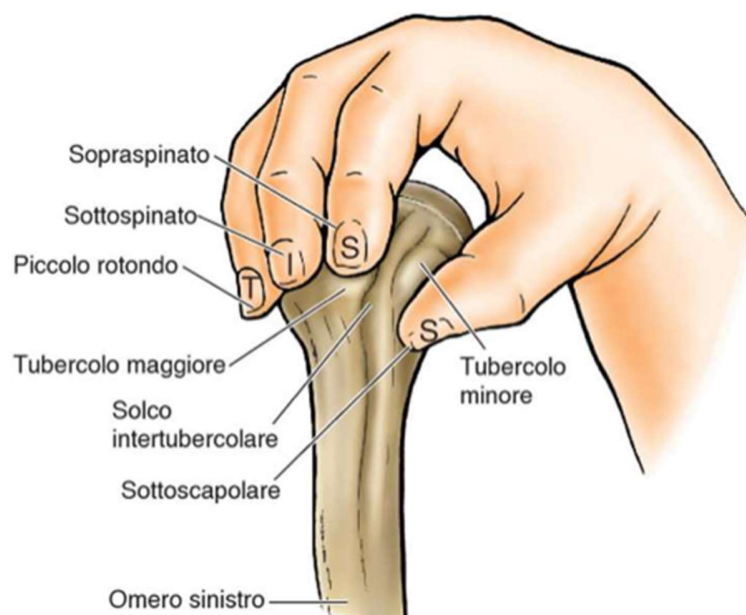


Figura 2.13 Inserzione dei muscoli della Cuffia dei Rotatori [11]

Sono ora analizzate le funzioni dei muscoli che costituiscono la cuffia dei rotatori.

- Il muscolo **Sopraspinato o Sovraspinato** con la sua azione abduce ed extraruota il braccio in sinergia con l'azione del deltoide;
- il muscolo **Sottospinato o Infraspinato** ruota esternamente il braccio e rinforza la capsula dell'articolazione scapolo-omeroale stabilizzandola;
- il muscolo **Sottoscapolare** adduce e intraruota il braccio;
- il muscolo **Piccolo Rotondo o Teres minor** con la sua azione sinergica nei confronti dell'infraspinato ruota debolmente verso l'esterno il braccio e stabilizza l'articolazione scapolo omeroale. È un muscolo allungato ed appiattito; la *faccia posteriore* è in rapporto con il deltoide e il grande rotondo mentre la *faccia anteriore* si pone in contatto con il muscolo sottoscapolare, con il capo lungo del tricipite e con la capsula dell'articolazione della spalla.

I muscoli che compongono la cuffia dei rotatori sono mostrati in *figura 2.13*.

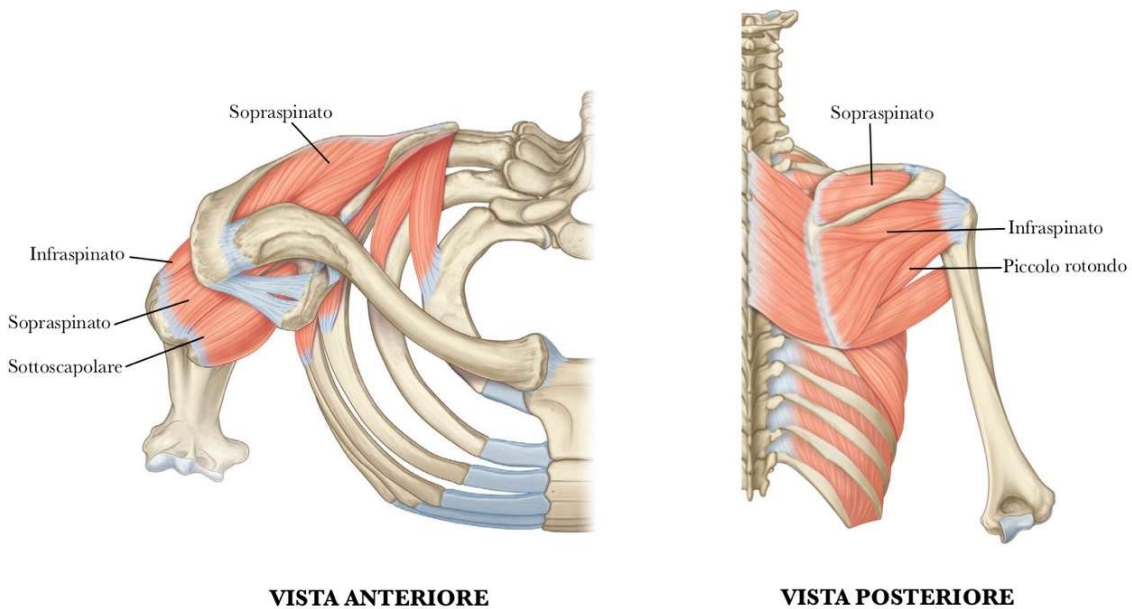


Figura 2.14 Muscoli della cuffia dei rotatori [1]

Il gruppo dei *muscoli estrinseci*, invece, è costituito da:

- ***Muscolo dentato anteriore***, mostrato in *figura 2.14*, si origina lateralmente dalle superfici esterne delle prime nove costole e si inserisce in corrispondenza del margine mediale della scapola. Consente di abduire e ruotare esternamente la scapola oltre a farla aderire al torace.

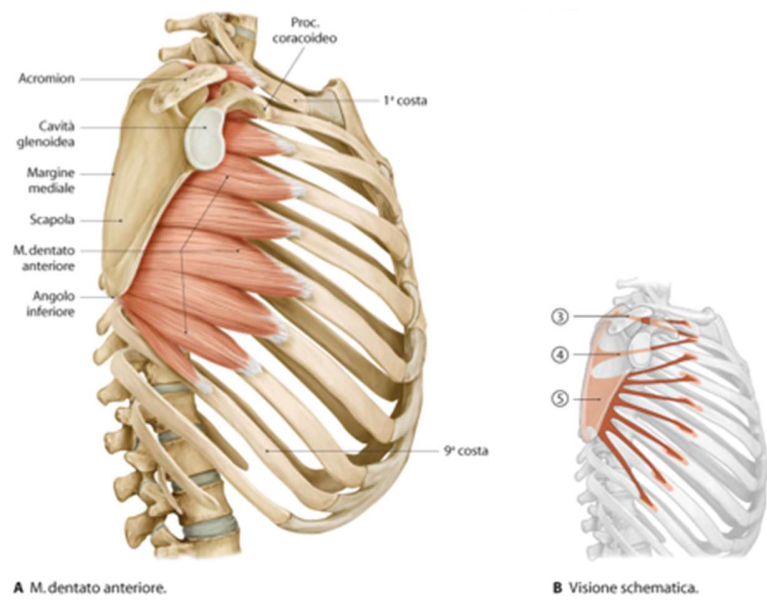


Figura 2.15 Muscolo Dentato Anteriore [12]

- **Muscolo Succlavio** si origina dalla prima costola e dalla relativa cartilagine costale a livello della loro giunzione e si inserisce anteriormente al margine mediale della scapola. Ha la funzione di stabilizzare e abbassare la clavicola oltre a fornire protezione al plesso brachiale e ai vasi sanguigni succlavi. (figura 2.15)



Figura 2.16 Muscolo Succlavio [13]

- **Muscolo Grande Dorsale** (figura 2.16) è composto da quattro parti che hanno origine diversa. La componente vertebrale si origina dai processi spinosi delle ultime sei vertebre toraciche ($T_7 - T_{12}$), dai processi spinosi delle vertebre lombari ($L_1 - L_5$) e dalla cosiddetta fascia toraco-lombare; la componente iliaca trae origine dalla cresta iliaca; la parte costale si origina dalle ultime tre-quattro costole (dalla 9 alla 12) ed infine la parte scapolare ha origine dall'angolo inferiore della scapola. Il muscolo grande dorsale si inserisce sul solco intertubercolare⁴ dell'omero e ha la funzione di estendere, intraruotare e addurre il braccio.

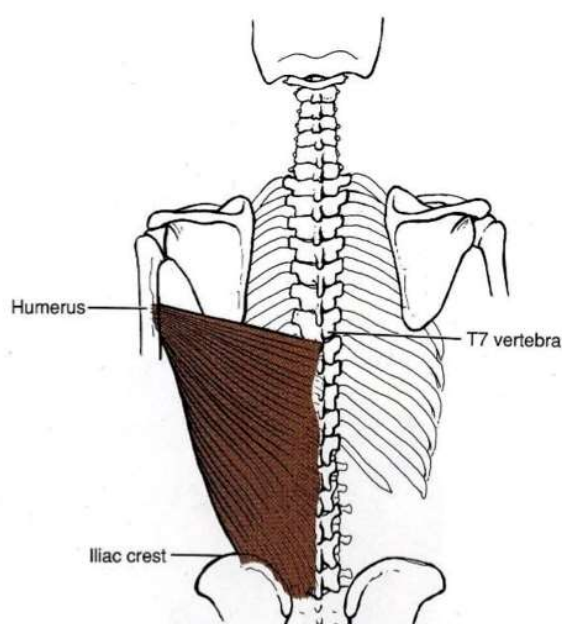


Figura 2.17 Muscolo Grande Dorsale [13]

- **Muscolo Elevatore della scapola** si origina dai processi trasversi delle prime quattro vertebre cervicali ($C_1 - C_4$). Si inserisce sull'angolo mediale e nella parte alta del margine vertebrale della scapola. Ha la funzione di sollevare e intraruotare la scapola. (figura 2.17)

⁴ Profonda depressione presente tra i due tubercoli dell'omero e percorsa dal tendine della lunga testa del muscolo brachiale.

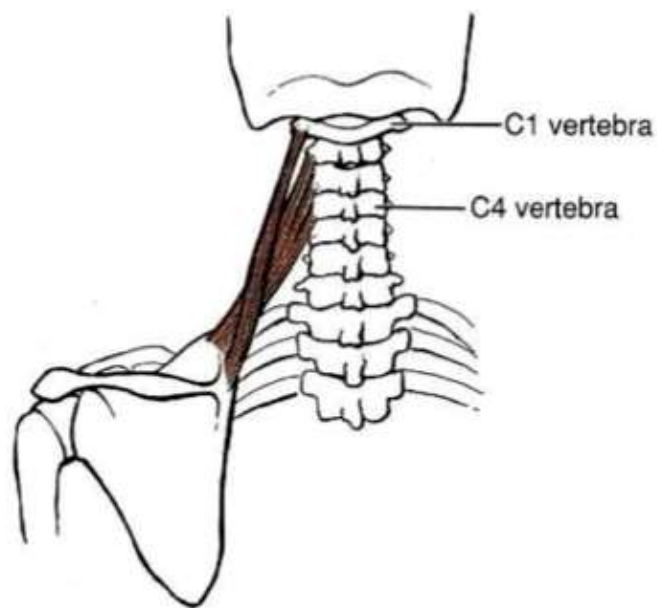


Figura 2.18 Muscolo Elevatore di Spalla [13]

- **Muscolo Grande e Piccolo Romboide** (figura 2.18) .Il muscolo Grande Romboide si origina in corrispondenza del processo spinoso delle vertebre toraciche ($T_2 - T_5$) e si inserisce sul bordo mediale della scapola mentre il Piccolo Romboide si origina dalla parte inferiore del legamento nucale e dai processi spinosi della settima vertebra cervicale (C_7) e della prima vertebra toracica (T_1). I due muscoli hanno la stessa funzione: fanno aderire strettamente la scapola al torace, la elevano, la ruotano internamente e la adducono.

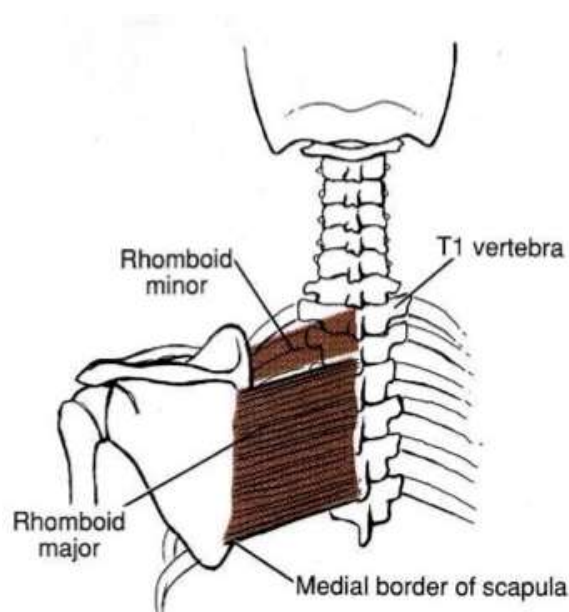


Figura 2.19 Grande e Piccolo Romboide [13]

- **Muscolo Trapezio**, come mostrato in figura 2.19, si origina dal terzo mediale della linea nucale superiore⁵, dalla protuberanza occipitale esterna, dal legamento nucale e dai processi spinosi della settima vertebra cervicale (C_7) e di tutte le vertebre toraciche; si inserisce in corrispondenza del terzo laterale del margine posteriore della clavicola, del margine mediale dell'acromion e della spina della scapola. Ha la funzione di elevare, abbassare, addurre ed extraruotare la scapola.

⁵ Una delle quattro linee curve sulla superficie esterna dell'osso occipitale

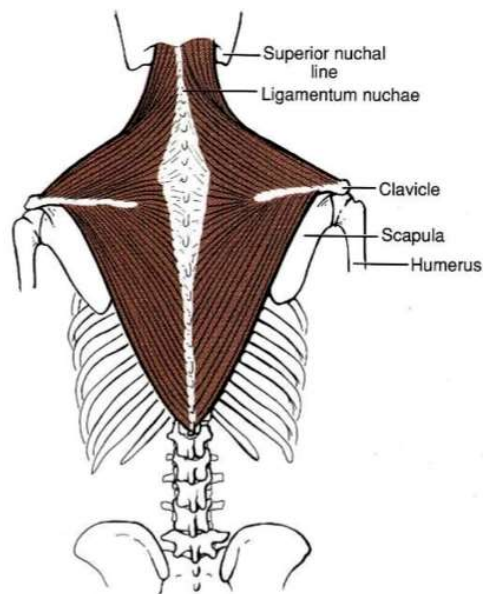


Figura 2.20 Muscolo Trapezio Romboide [13]

MUSCOLO	ORIGINE	INSERZIONE	FUNZIONE
DELTOIDE	Capo anteriore → clavicola Capo laterale → acromion Capo posteriore → spina scapolare	Tuberosità deltoidea del corpo dell'omero	Medialmente: 1) Abduzione del braccio 2) Flessione del braccio 3) Rotazione del braccio Lateralmente: 1) Estensione del braccio 2) Rotazione del braccio
CUFFIA DEI ROTATORI	Scapola	Tubercolo maggiore e minore dell'omero	Contraendosi stabilizza la spalla impedendone la lussazione

DENTATO ANTERIORE SUCCLAVIO GRANDE DORSALE	Superfici esterne delle parti laterali delle prime nove costole	Margine mediale della scapola	1) Abdurre la scapola 2) Ruotare esternamente la scapola 3) Farla aderire al torace
	I° costola e dalla relativa cartilagine costale a livello della loro giunzione e si inserisce.	Anteriormente al margine mediale della scapola	1) Sabilizzare e abbassare la clavicola 2) Proteggere il plesso brachiale e i vasi sanguigni succlavi
	→componente vertebrale: dai processi spinosi ($T_7 - T_{12}$), dai processi spinosi ($L_1 - L_5$), dalla fascia toraco-lombare; →componente iliaca: dalla cresta iliaca; →componente costale: dalle IX alla XII costole →componente scapolare: dall'angolo inferiore della scapola	Solco intertubercolare dell'omero	1) Estendere il braccio, 2) Intraruotare il braccio, 3) Addurre il braccio.

ELEVATORE DELLA SCAPOLA	Processi trasversi delle prime quattro vertebre cervicali ($C_1 - C_{14}$).	Angolo mediale e nella parte alta del margine vertebrale della scapola.	1) Sollevare la scapola 2) Intraruotare la scapola
GRANDE E PICCOLO ROMBOIDE	GRANDE: processo spinoso delle vertebre toraciche ($T_2 - T_5$) PICCOLO: → parte inferiore del legamento nucale → dai processi spinosi di C_7 → da T_1	Bordo mediale della scapola	1) Far aderire strettamente la scapola al torace, 2) Elevare la scapola 3) Ruotare internamente la scapola e 4) Addurre la scapola
TRAPEZIO	→ dal III mediale della linea nucale superiore, → dalla protuberanza occipitale esterna, → dal legamento nucale → dai processi spinosi di C_7 e di tutte le vertebre toraciche	- Il laterale del margine posteriore della clavicola, - margine mediale dell'acromion - spina della scapola.	1) Elevare la scapola, 2) Abbassare la scapola, 3) Addurre la scapola 4) Extraruotare la scapola.

Tabella 2 Tabella riassuntiva dei muscoli della Spalla

2.1.3.2 I muscoli del Braccio

I muscoli del braccio sono quattro e in base alla loro localizzazione nel braccio possono essere classificati in due differenti gruppi: i *muscoli della loggia anteriore* del braccio, che risiedono nella regione anteriore del braccio, e i *muscoli della loggia posteriore*, che occupano la regione posteriore del braccio.

I muscoli appartenenti alla *loggia anteriore* sono tre:

1. muscolo **Bicipite Brachiale**, rappresentato in *figura 2.20*, che è costituito da un capo lungo, che si origina dal tubercolo sovra-glenoideo della scapola e da un capo breve, che invece si origina

dall'apice del processo coracoideo; i due capi si uniscono in un unico ventre muscolare in prossimità del terzo medio del braccio che si inserisce con un robusto tendine in corrispondenza della tuberosità bicipitale del radio. Dal margine mediale di questo tendine diparte un secondo tendine, superficiale, chiamato aponeurosi⁶ brachiale che si espande in basso e medialmente fondendosi con la fascia antibrachiale. La funzione del muscolo bicipite brachiale è quella di flettere il braccio e l'avambraccio, di supinare il palmo della mano durante la flessione dell'avambraccio; il capo breve del muscolo si oppone alla lussazione di spalla.

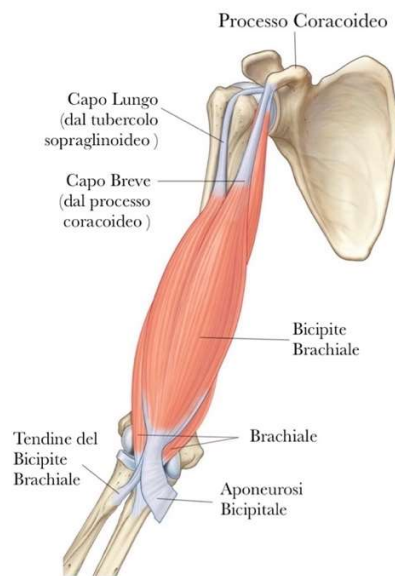


Figura 2.21 Bicipite Brachiale [1]

2. il **Muscolo Brachiale** (figura 2.21), muscolo anteroinferiore del braccio, allungato e appiattito che con la sua azione flette l'avambraccio. Si origina subito al di sotto dell'inserzione del deltoide dalle facce anteromediale e anterolaterale dell'omero e decorre fino al livello dell'epifisi dell'articolazione del gomito dove si inserisce sull'ulna. Si rapporta anteriormente con il muscolo bicipite, il muscolo brachioradiale, il pronatore rotondo e il fascio vascolonervoso mentre posteriormente con il piano osseo e l'articolazione di gomito

⁶ Lamina fibrosa nastriforme di colore bianco perlaceo

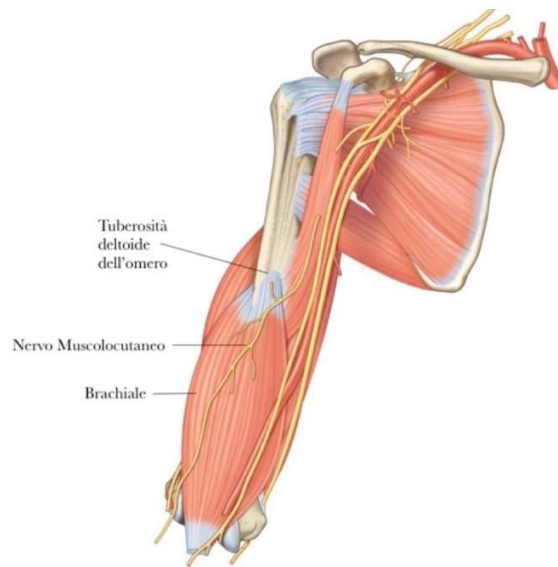


Figura 2.22 Muscolo Brachiale [1]

3. Muscolo **Coracobrachiale** si origina dall'apice del processo coracoideo della scapola e, attraverso ad un tendine piatto, si inserisce in corrispondenza del terzo medio della faccia anteromediale del corpo dell'omero. Il muscolo coracobrachiale contribuisce alla flessione e alla adduzione; si oppone alla lussazione della spalla. (figura 2.22)

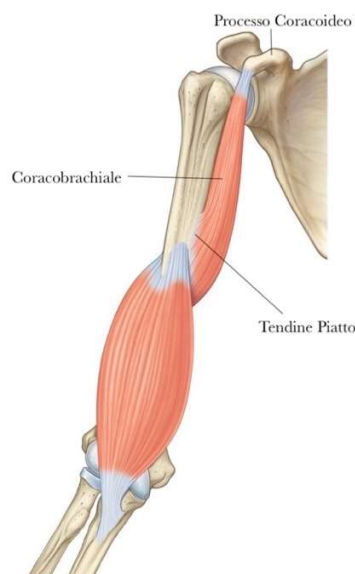


Figura 2.23 Muscolo Coracobrachiale [1]

Alla *loggia posteriore* del braccio appartiene un unico muscolo, ossia il muscolo **Tricipite Brachiale**.

Il **Tricipite Brachiale** (figura 2.23) è costituito da un tre capi: uno lungo, che si origina dalla tuberosità sottoglenoidea scapola, uno laterale e uno mediale che si originano rispettivamente dalla faccia posteriore dell'omero rispettivamente al di sopra e al di sotto del solco del nervo radiale. I tre capi muscolari procedono verso il basso e, per mezzo di un robusto tendine, si inseriscono sulla faccia superiore e posteriore dell'olecrano⁷. Il tricipite si rapporta posteriormente con il deltoide e con la fascia brachiale e anteriormente con l'omero e con l'articolazione del gomito. La sua funzione è quella di estendere l'avambraccio e, per mezzo del capo lungo, di addurre ed estendere la spalla.

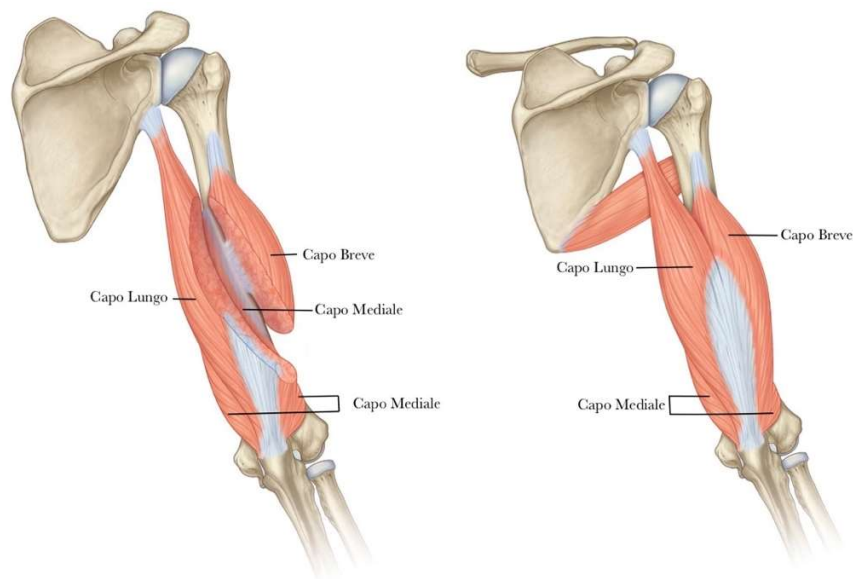


Figura 2.24 Tricipite Brachiale [1]

MUSCOLO	ORIGINE	INSERZIONE	FUNZIONE
BICIPITE BRACHIALE	Capo lungo → tubercolo sovra-glenoideo Capo breve→ processo coracoideo	Tuberosità bicipitale del radio	1) Flettere il braccio e l'avambraccio; 2) Supinare il palmo della mano durante la flessione dell'avambraccio; 3) Il capo breve del muscolo si oppone

⁷ Processo osseo che prolunga l'estremità superiore dell'ulna e sulla parete posteriore della capsula articolare del gomito.

BRACHIALE			alla lussazione di spalla.
	Faccia anteromediale e anterolaterale dell'omero	Ulna	Flessione avambraccio
	Processo coracoideo	Terzo medio della faccia anteromediale del corpo dell'omero	1) Flessione e alla adduzione; 2) si oppone alla lussazione della spalla.
CORACOBRAHIALE			
TRICIPITE BRACHIALE	Capo lungo → tubercolo sotto-glenoideo Capo breve e mediale → faccia posteriore omero.	- faccia superiore e posteriore dell'olecrano; - processo osseo che prolunga l'estremità superiore dell'ulna - parete posteriore della capsula articolare del gomito.	1) Estendere avambraccio 2) Capo lungo → Estendere e addurre la spalla

Tabella 3 Riassunto dei Muscoli del Braccio

I muscoli dell'avambraccio possono essere classificati in due differenti gruppi: i *muscoli della loggia anteriore* dell'avambraccio e i *muscoli della loggia posteriore*; le due logge sono separate dal radio, dall'ulna e dalla membrana interossea.

I muscoli appartenenti alla *loggia anteriore* sono muscoli flessori che decorrono fino in corrispondenza della mano dove sono tenuti in posizione dal legamento palmare del carpo e dal retinacolo dei muscoli flessori. A sua volta la *loggia anteriore* può essere suddivisa in tre differenti strati:

1. lo *strato superficiale* (figura 2.24), al quale appartengono i seguenti muscoli:
 - ***Brachioradiale*** si origina in corrispondenza dell'epicondilo laterale dell'omero e si inserisce in corrispondenza del processo stiloideo del radio; consente la flessione del gomito e la pronosupinazione dell'avambraccio.
 - ***Pronatore rotondo*** è costituito da due capi: uno che si origina in corrispondenza dell'epicondilo mediale dell'omero e uno che si origina dal processo coronoideo dell'ulna, i due capi si inseriscono a metà della superficie laterale del radio. Il muscolo agisce come pronatore dell'avambraccio e partecipa anche alla flessione del gomito quando l'avambraccio è pronato.
 - ***Flessore radiale del carpo*** si origina in corrispondenza dell'epicondilo mediale dell'omero e si aggancia alla base del II e del III metacarpo della mano; contribuisce ai movimenti di flessione e abduzione del polso.
 - ***Palmare lungo carpo*** si origina in corrispondenza dell'epicondilo mediale dell'omero e si aggancia sul legamento trasverso del carpo; contribuisce alla flessione del polso.
 - ***Flessore ulnare del carpo*** è costituito da due capi: uno che si origina in corrispondenza dell'epicondilo mediale dell'omero e uno che si origina dall'olecrano dell'ulna, i due capi si inseriscono in corrispondenza dell'osso pisiforme del carpo. Il muscolo contribuisce ai movimenti di flessione ed estensione del polso.
2. lo *strato intermedio* (figura 2.24 e 2.25) a cui appartiene il muscolo ***Flessore Superficiale delle dita (FSD)*** costituito da due capi: uno che si origina in corrispondenza dell'epicondilo dell'omero e l'altro che si origina in corrispondenza del radio. Il muscolo si suddivide in quattro diversi capi terminali che si inseriscono in corrispondenza delle falangi mediale delle dita lunghe. Il flessore superficiale delle dita contribuisce alla flessione delle dita lunghe della mano: controlla il movimento durante la flessione delle articolazioni metacarpo-falangee e interfalangee prossimali.

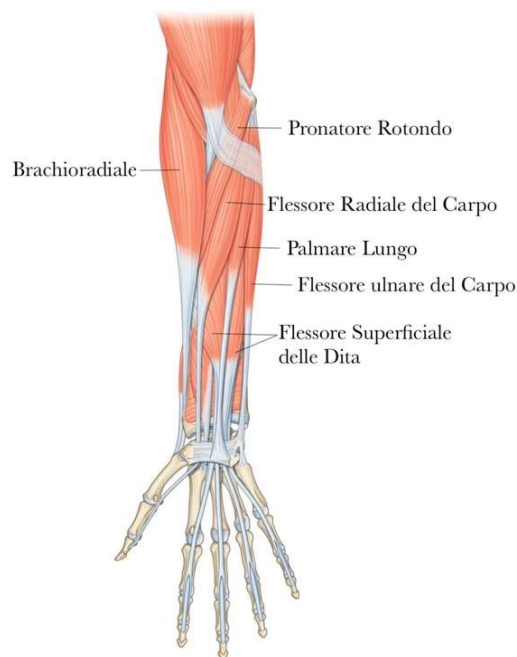


Figura 2.25 Muscoli dello strato superficiale e intermedio della loggia anteriore dell'avambraccio [1]

3. lo strato profondo (figura 2.25) a cui appartengono i seguenti muscoli:

- **Flessore Profondo delle dita (FPD)** si origina dalla superficie anteriore e mediale dell'ulna e dalla membrana interossea interposta tra ulna e radio. Il muscolo si suddivide in quattro diversi capi terminali che si inseriscono in corrispondenza delle falangi distali delle dita lunghe. Il flessore superficiale delle dita contribuisce alla flessione delle dita lunghe della mano: controlla il movimento, durante la flessione del polso, delle articolazioni metacarpo-falangee e delle articolazioni interfalangee.
- **Flessore Lungo del pollice (FLP)** si origina dalla superficie anteriore del radio e sull'adiacente membrana interossea e si aggancia alla base della falange distale del pollice; consente la flessione del pollice.
- **Pronatore Quadrato** si origina dalla superficie anteriore mediale dell'ulna e si aggancia alla superficie anteriore laterale del radio; contribuisce alla pronazione dell'avambraccio.

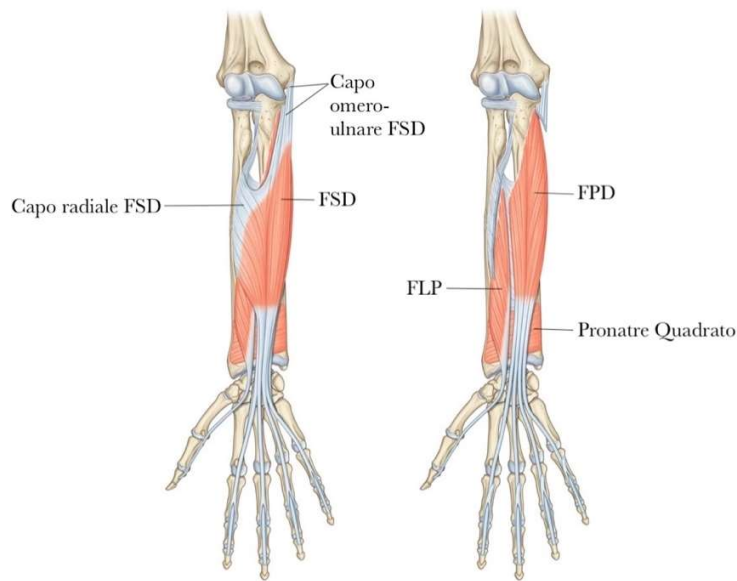


Figura 2.26 Muscoli dello strato intermedio e profondo della loggia anteriore dell'avambraccio [1]

La loggia posteriore (figura 2.26) è composta da:

1. uno *strato superficiale* a cui appartengono i seguenti sei differenti muscoli:
 - ***Estensore radiale lungo del carpo*** si origina dall'epicondilo laterale dell'omero e si inserisce in corrispondenza del II metacarpo della mano; permette l'estensione e l'abduzione del polso.
 - ***Estensore radiale breve del carpo*** si origina dall'epicondilo laterale dell'omero e si inserisce, mediante il tendine comune dei muscoli estensori, in corrispondenza del III metacarpo della mano. Supporta il muscolo estensore lungo del carpo nei movimenti di estensione e abduzione del polso.
 - ***Estensore ulnare del carpo*** si origina dalla faccia posteriore dell'epicondilo laterale dell'omero, dalla faccia posteriore dell'ulna mediante aponeurosi e dalla fascia antibrachiale e si inserisce in corrispondenza del V metacarpo della mano. Mediante la sua contrazione estende e adduce la mano.
 - ***Estensore comune delle dita*** si origina dall'epicondilo laterale dell'omero per poi suddividersi in quattro diversi capi terminali che si inseriscono in corrispondenza delle falangi intermedie e

distali delle dita lunghe della mano. Provvede all'estensione delle dita a livello delle articolazioni metacarpo-falangee e interfalangee.

- ***Estensore del mignolo*** si origina dalla porzione anteriore dell'epicondilo laterale dell'omero e si aggancia in corrispondenza della falange prossimale del dito mignolo; controlla l'estensione del dito mignolo e contribuisce all'estensione del polso.
- ***Supinatore*** si origina dall'epicondilo laterale dell'omero e dalla faccia superiore del margine laterale dell'ulna. Si inserisce in corrispondenza della superficie anteriore del radio; permette la supinazione dell'avambraccio.

2. Uno *strato profondo* costituito dai seguenti muscoli:

- l'***Abduttore lungo del pollice*** che si origina dalla faccia dorsale di ulna e radio e dalla membrana interossea per poi inserirsi in corrispondenza del I metacarpo; la sua funzione principale è l'abduzione del pollice ma interviene anche nell'abduzione e nella flessione palmare della mano.
- l'***Estensore breve del pollice*** che si origina dalla faccia posteriore del radio e dalla membrana interossea per poi inserirsi in corrispondenza della faccia dorsale della falange prossimale del pollice; consente l'estensione della falange prossimale del pollice l'abduzione del pollice.
- l'***Estensore lungo del pollice*** che si origina dalla faccia dorsale dell'ulna e dalla membrana interossea per poi inserirsi in corrispondenza della base della falange distale del pollice; consente l'estensione e l'abduzione del pollice, la flessione dorsale e abduzione in direzione radiale della mano.
- l'***Estensore proprio del dito indice*** che si origina in corrispondenza di un punto della superficie posteriore della porzione distale dell'ulna e dalla membrana interossea per poi agganciarsi all'aponeurosi dorsale del dito indice. La sua funzione è quella di estendere il dito indice.

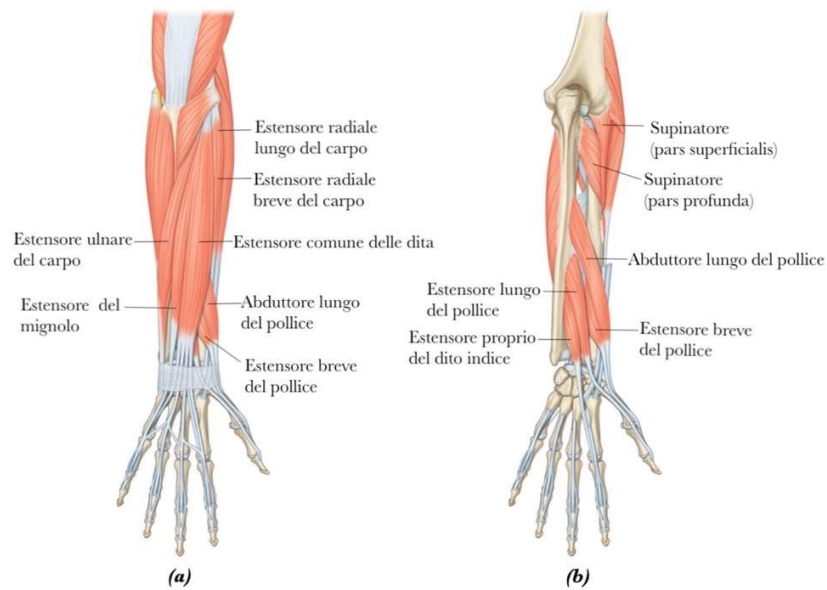


Figura 2.27 Muscoli dello strato superficiale(a) e profondo (b) della loggia posteriore dell'avambraccio [1]

MUSCOLO	ORIGINE	INSERZIONE	FUNZIONE
BRACHIORADIALE	Epicondilo laterale omero	Processo stiloideo del radio	1. Flessione del gomito 2. Prono-supinazione dell'avambraccio
PRONATORE ROTONDO	1° Capo→dell'epicondilo mediale dell'omero 2° Capo→ processo coronoideo dell'ulna	A metà della superficie laterale del radio	1. Pronatore dell'avambraccio 2. Flessione del gomito quando l'avambraccio è pronato

FLESSORE RADIALE DEL CARPO	Epicondilo laterale omero	Base del II e del III metacarpo	Flessione e alla abduzione polso
PALMARE LUNGO DEL CARPO	Epicondilo laterale omero	Legamento trasverso del carpo	Flessione e abduzione polso
FLESSORE ULNARE DEL CARPO	1° Capo → dell'epicondilo mediale dell'omero 2° Capo → olecrano dell'ulna	Osso pisiforme del carpo	Flessione ed estensione del polso
<i>FLESSORE PROFONDO DELLE DITA (FPD)</i>	Superficie anteriore e mediale dell'ulna e dalla membrana interossea i	Falangi distali delle dita lunghe.	Flessione delle dita lunghe della mano
<i>FLESSORE LUNGO DEL POLLICE DELLE DITA (FPD)</i>	Superficie anteriore del radio e sull'adiacente membrana interossea	Falange distale del pollice	Flessione del pollice.
<i>PRONATORE QUADRATO</i>	Superficie anteriore mediale dell'ulna	Superficie anteriore laterale del radio	Pronazione dell'avambraccio

<i>ESTENSORE RADIALE LUNGO E BREVE DEL CARPO</i>	Epicondilo laterale dell'omero	LUNGO→ II metacarpo della mano BREVE→ III metacarpo della mano	Estensione e l'abduzione del polso
<i>ESTENSORE ULNARRE DEL CARPO</i>	- Faccia posteriore dell'epicondilo laterale dell'omero, - dalla faccia posteriore dell'ulna mediante aponeurosi - dalla fascia antibrachiale	V metacarpo della mano	Estensione e l'adduzione della mano
ESTENSORE COMUNE DELLE DITA	Epicondilo laterale dell'omero	Falangi intermedie e distali delle dita lunghe della mano	Estensione delle dita a livello delle articolazioni metacarpo-falangee e interfalangee.
<i>ESTENDORE DEL MIGNOLO</i>	Porzione anteriore dell'epicondilo laterale dell'omero	Falange prossimale del dito mignolo	1. Estensione del dito mignolo Estensione del polso.
SUPINATORE	- Epicondilo laterale dell'omero - Faccia superiore del margine laterale dell'ulna.	Superficie anteriore del radio	Supinazione dell'avambraccio
<i>ABDUTTORE LUNGO DEL POLLICE</i>	- Faccia dorsale di ulna e radio - Membrana interossea la sua funzione principale è	I metacarpo	1. Abduzione del pollice 2. Abduzione e flessione palmare della mano

ESTENSORE BREVE E LUNGO DEL POLLICE	BREVE→ - faccia posteriore del radio - membrana interossea per poi inserirsi in corrispondenza della; consente. LUNGO→ - Faccia dorsale dell'ulna membrana interossea consente	BREVE→ Faccia dorsale della falange prossimale del pollice LUNGO→ falange distale del pollice	BREVE→ - Estensione della falange prossimale del pollice - Abduzione del pollice LUNGO→ - Estensione e abduzione del pollice - Flessione dorsale Abduzione in direzione radiale della mano
	- Superficie posteriore della porzione distale dell'ulna - Membrana interossea	Aponeurosi dorsale del dito indice	Estensione indice.

Tabella 4 Tabella riassuntiva dei muscoli dell'avambraccio

2.2 La mano

La mano è il corpo più distale dell'arto superiore ed è composta dal polso, che media la continuità della mano con l'avambraccio, dal metacarpo, che ne costituisce la porzione più ampia, e dalle dita. La caratteristica principale della mano è quella di poter adattare la sua forma rispetto all'oggetto con cui interagisce.

I complessi movimenti permessi alla mano sono permessi da più articolazioni mobili che, instaurandosi tra le ossa che compongono la mano stessa, permettono di distinguerne più segmenti.

Le ossa della mano, come rappresentato in *figura 2.27*, sono 27 e si suddividono in:

1. *Carpio*: composto da 8 ossa brevi organizzate su due file.
2. *Metacarpo*: composto da 5 ossa lunghe situate nella zona mediale della mano.
3. *Falangi*: 14 ossa lunghe. Ciascun dito è costituito da 3 falangi distinte in falange prossimale, media e distale (pollice escluso).

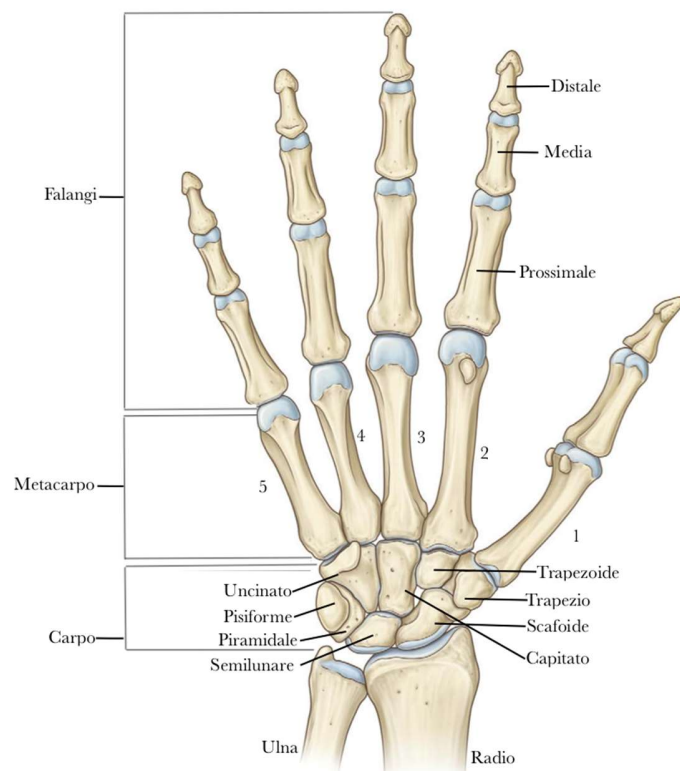


Figura 2.28 Struttura ossea della mano superiore [1]

1. *Il Carpo*

Il complesso carpale è costituito da otto ossa brevi disposte lateralmente su due file, una prossimale e una distale. Le ossa appartenenti alla fila prossimale sono: lo scafoide, il semilunare, il piramidale e il pisiforme mentre nella fila distale si distingue l'osso uncinato, il grande osso, il trapezio e il trapezoide. La fila prossimale entra in contatto con la parte distale del radio mediante l'articolazione radio-carpale e con l'ulna attraverso un disco articolare, detto legamento triangolare, dell'articolazione radio - ulnare distale.

2. *Il Metacarpo*

Il metacarpo è costituito da cinque ossa denominate con numeri d'ordine progressivi dal lato radiale a quello ulnare. Le ossa metacarpali sono costituite da un corpo, da un'estremità prossimale e da una distale; si presentano come ossa lunghe, cave, ricche di midollo e si articolano prossimalmente con il carpo e distalmente con le falangi. Il primo metacarpale, più corto e più grosso degli altri, si articola col trapezio, godendo di un'ampia libertà di movimento; mentre gli altri quattro sono strettamente legati al complesso carpale, attraverso i legamenti dorsali e palmari, e vincolati da una robusta formazione fibrosa che consente una limitata mobilità passiva.

3. *Le Falangi*

Le falangi sono ossa lunghe costituite da una porzione distale, una prossimale e una centrale. In ciascun dito sono presenti tre falangi, ad eccezione del pollice il quale presenta solo due falangi, la prossimale e la distale. Per poter analizzare i movimenti delle dita occorre definire i piani della mano (*figura 2.28*): posta la mano in posizione anatomica aperta, si definisce piano frontale il piano passante per l'asse del dito medio e parallelo al palmo aperto e piano sagittale il piano passante per l'asse del dito medio ed ortogonale al piano frontale. La direzione dell'asse del dito medio rivolta verso il polso prende il nome di direzione prossimale mentre la direzione opposta viene detta direzione distale. La direzione risultante dall'intersezione fra piano sagittale e piano frontale viene detta direzione radiale se rivolta verso il pollice e direzione ulnare se rivolta in verso opposto.

Si definisce allora movimento di flessione il movimento di chiusura del dito sul piano sagittale e movimento di estensione quello di apertura sempre sul piano sagittale.

Il movimento di avvicinamento delle dita sul piano frontale è detto movimento di adduzione mentre quello opposto, ossia il movimento di allontanamento delle dita sul piano frontale, è detto movimento di abduzione. Durante questi movimenti il medio resta praticamente immobile.

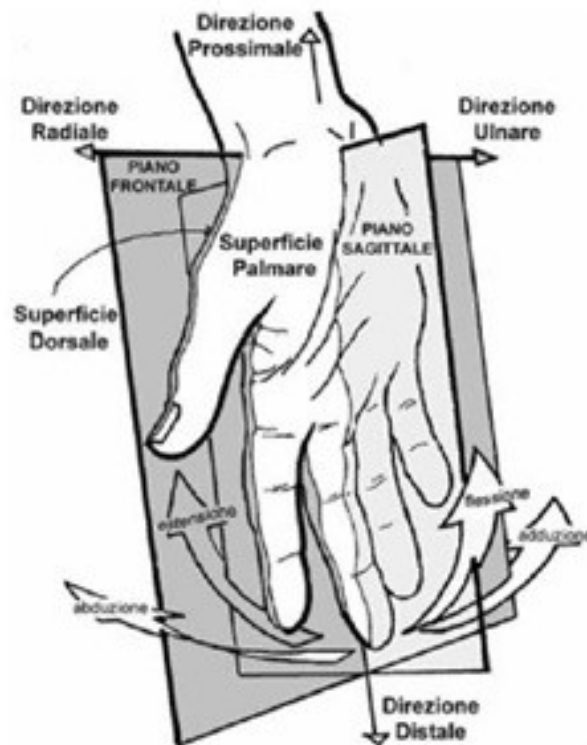


Figura 2.29 Piani e direzioni della mano [6]

Nella mano si distinguono quattro diverse articolazioni:

- a. *Articolazioni del polso;*
- b. *Articolazione carpo-metacarpica;*
- c. *Articolazioni del metacarpo (metacarpo - falangee);*
- d. *Articolazioni delle dita (interfalangee).*

a. *Articolazione del polso*

È l'articolazione distale dell'arto superiore a sua volta costituita da due diverse articolazioni: la radio-carpica, che articola la parte prossimale del radio con la parte distale delle ossa del carpo e la medio-

carpica, che articola tra di loro le due fila delle ossa del carpo tenute insieme da numerosi legamenti. I movimenti del polso si effettuano attorno a due assi: il primo trasversale contenuto nel piano frontale che consente i movimenti di flesso - estensione effettuati nel piano sagittale e il secondo antero- posteriore compreso nel piano sagittale che permette i movimenti di abduzione – adduzione effettuati nel piano frontale.

L'ampiezza dei movimenti di **flesso-estensione** è pari a 85° (Kapanji,1974) ottenuta partendo dalla **posizione di riferimento** che prevede il polso dritto con il dorso della mano orientato lungo l'asse longitudinale del corpo.

La flesso-estensione è garantita grazie al lavoro sinergico del legamento posteriore e di quello anteriore dell'articolazione radio-carpica, che si tendono rispettivamente durante la flessione e la estensione, e al lavoro dell'articolazione medio-carpica.

Il movimento di flesso - estensione della mano è rappresentato in *figura 2.29*.

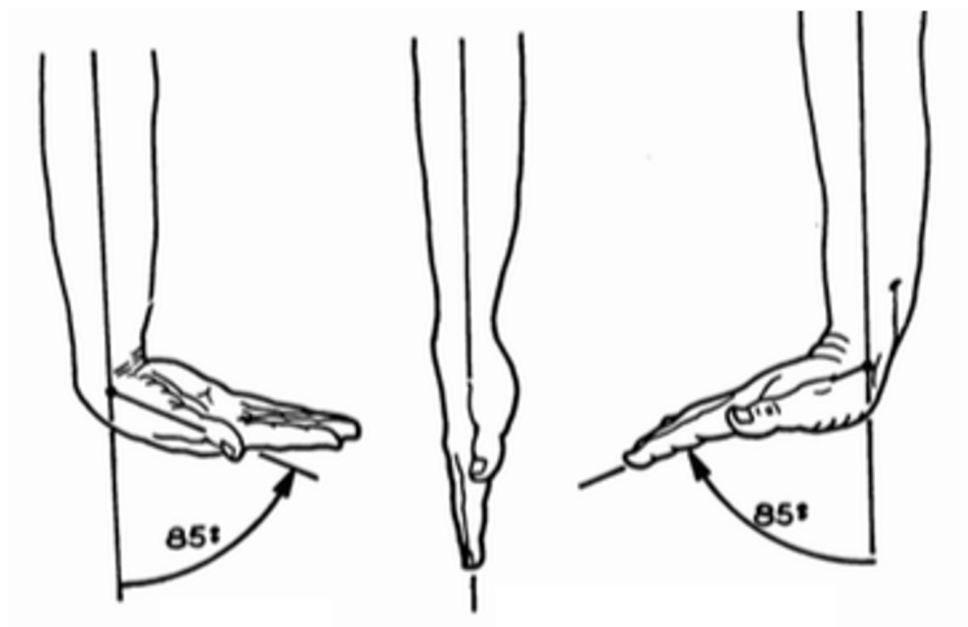


Figura 2.30 Flesso-estensione e posizione di riferimento del polso [6]

L'ampiezza dei movimenti di **abduzione – adduzione**, mostrata in *figura 2.30*, si misura dopo aver definito una nuova **posizione di riferimento** che prevede, come asse di riferimento della mano, l'asse passante per il terzo metacarpo. L'ampiezza dell'adduzione, quando si misura l'angolo sulla linea che unisce il centro del polso con l'estremità del terzo dito, è di circa 45° mentre l'ampiezza della abduzione non supera i 15° (Kapanji,1974). Il movimento di abduzione - adduzione avviene nell'articolazione medio - carpica

ed è permesso grazie all'azione dei legamenti collaterali dell'articolazione radiocarpica, i quali si distendono internamente e si tendono esternamente durante l'adduzione mentre si comportano in maniera opposta durante la abduzione.

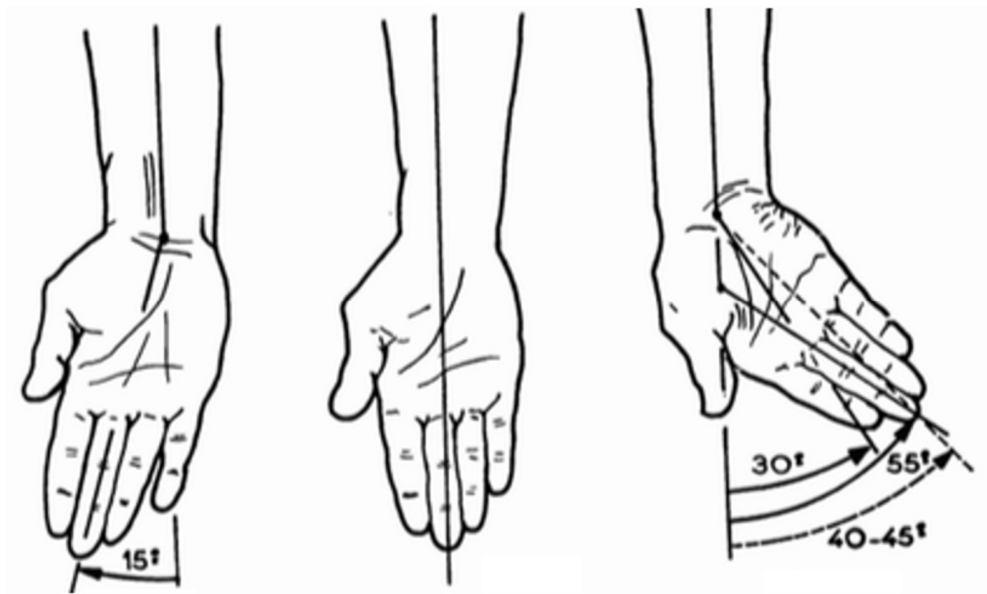


Figura 2.31 Abduzione, posizione di riferimento e adduzione del polso [6]

Dalla combinazione dei movimenti di flesso – estensione con quelli di abduzione - adduzione si ottiene il movimento di **circonduzione**.

Come già spiegato nel sottocapitolo 2.1.2 il movimento di **prono-supinazione** richiede il coinvolgimento sia dell'articolazione radio-ulnare superiore che di quella inferiore e viene studiata solo quando il gomito è flesso a 90° e aderente al corpo. Partendo da questa condizione, la posizione di **supinazione** viene raggiunta quando il palmo della mano è rivolto verso l'alto e il pollice lateralmente mentre la posizione di **pronazione** è ottenuta quando il palmo della mano è rivolto verso il basso e il pollice medialmente. È possibile definire anche una posizione **intermedia** a partire dalla quale vengono calcolate le ampiezze dei movimenti di prono - supinazione. Questa posizione è ottenuta ruotando la mano affinché sia situata in un piano verticale, parallelo al piano di simmetria del corpo (piano sagittale).

Partendo dalla posizione intermedia, l'ampiezza del movimento della supinazione è pari a 90° mentre il range di pronazione è di 85° dal momento che ulna e radio non sono paralleli bensì incrociati. L'ampiezza totale della prono – supinazione, che non prevede la rotazione dell'avambraccio, è di circa 180° (Kapanji, 1974) ed è rappresentata in *figura 2.31*.

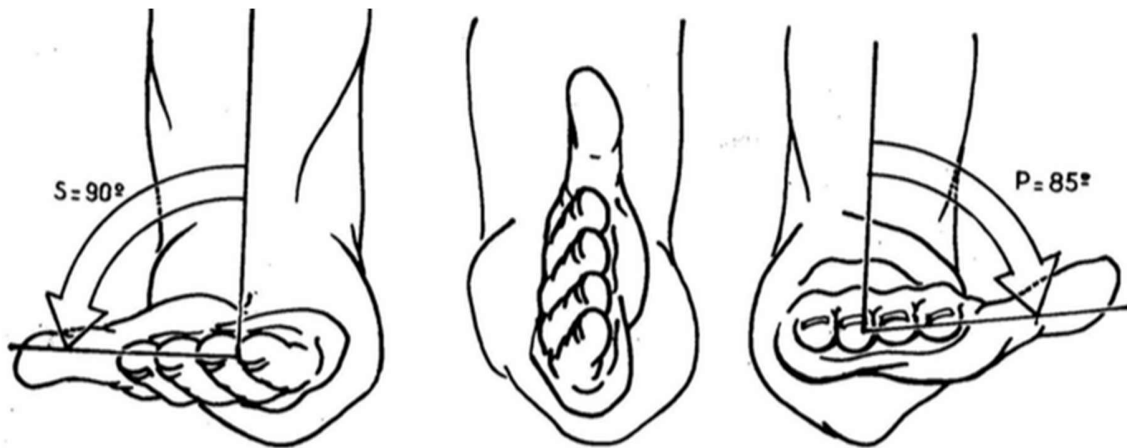


Figura 2.32 Movimento di prono-supinazione [6]

b. Articolazione carpo-metacarpica

Le articolazioni carpo-metacarpiche si stabiliscono tra le ossa della fila distale del carpo e la base delle cinque ossa metacarpali. I movimenti delle articolazioni carpo-metacarpiche delle quattro dita lunghe sono piuttosto limitati dalla presenza dei legamenti e di una robusta capsula fibrotica.

L'articolazione carpo-metacarpica del pollice, chiamata *trapezio-metacarpica*, è un'articolazione a sella fra la faccia distale del trapezio e la base del primo osso metacarpale che, nonostante i legamenti, presenta una capsula fibrotica relativamente lassa consentendo un'ampia libertà di movimento.

I movimenti consentiti sono:

- **anteposizione** (il metacarpo si porta sopra il palmo della mano) e **retroposizione** (il metacarpo è nel piano del palmo della mano) nel piano sagittale attorno all'asse passante per il centro della curvatura concava della superficie metacarpica e per il centro della curvatura convessa della superficie del trapezio. L'ampiezza del movimento è compresa tra i 50° e i 90° (Kapanji, 1974).

- **abduzione** (il metacarpo si allontana dall'asse della mano) e **adduzione** (il metacarpo avvicina all'asse della mano) nel piano frontale attorno all'asse passante per la base del primo trapezio, per centro della curvatura concava della superficie del trapezio e per centro della curvatura convessa della superficie metacarpica. L'ampiezza del movimento è compresa tra i 40° e i 50° (Kapanji, 1974).

La **posizione di riferimento** per questi movimenti di anteposizione-retroposizione e d'abduzione-adduzione, indicata in *figura 2.32*; con la lettera a è la posizione di riposo muscolare, dove il primo metacarpo forma con il secondo un angolo di 40° d'anteposizione e 20° di abduzione (Kapanji,1974).

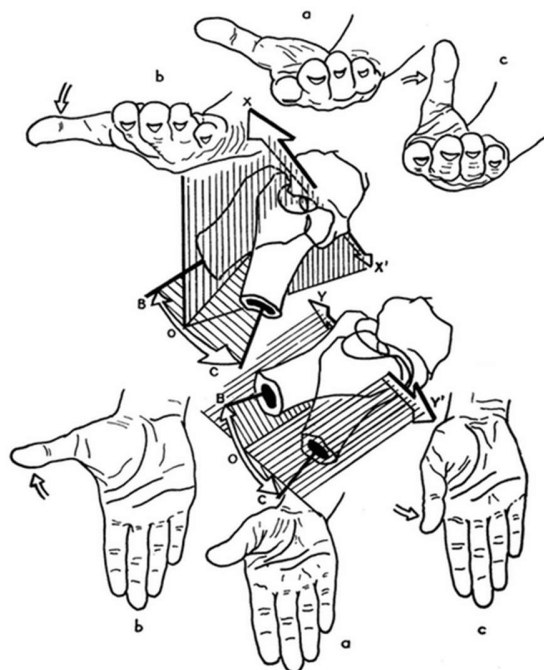


Figura 2.33 Movimenti di flesso-estensione (b e c) e abduzione-adduzione (b e c) dell'articolazione trapezio -metacarpica del pollice [6].

c. Articolazione del metacarpo (metacarpo-falangea)

Le articolazioni metacarpo-falangee si instaurano tra i capitelli delle ossa metacarpali e le basi delle prime falangi e posseggono due gradi di libertà (flesso-estensione nel piano sagittale attorno all'asse trasversale e abduzione-adduzione nel piano frontale attorno all'asse antero-posteriore).

Nelle dita lunghe, l'ampiezza della **flessione** è vicina ai 90°. La flessione isolata del medio risulta essere limitata a causa della tensione del legamento palmare interdigitale. L'**estensione** si suddivide in attiva e passiva: la prima è variabile e dipende dai soggetti raggiungendo valori intorno ai 30°- 40° mentre la seconda può raggiungere i valori di 90° nei soggetti che presentano lassità legamentosa (Kapanji,1974). I movimenti di flesso-estensione dell'articolazione metacarpo-falangea sono rappresentati in *figura 2.33*.

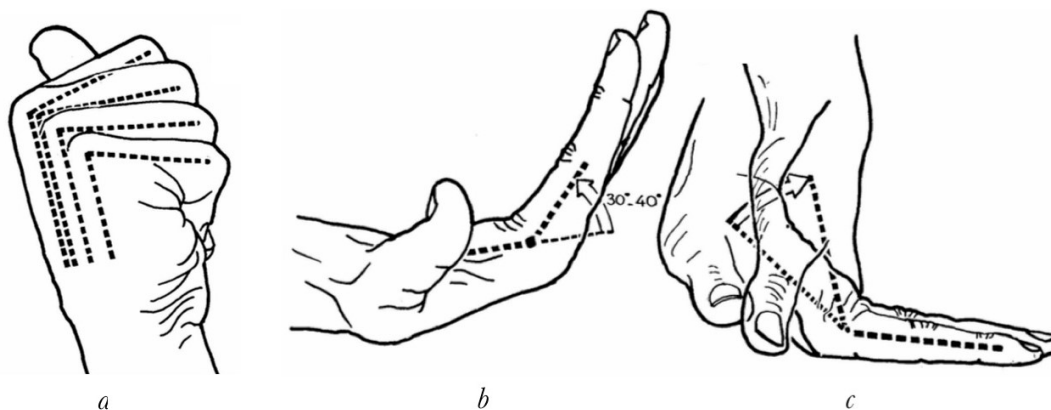


Figura 2.34 Ampiezza (a) della flessione, (b) dell'estensione attiva e (c) dell'estensione passiva dell'articolazione metacarpo-falangea [6].

La possibilità di **abduzione - adduzione** durante la flessione (figura 2.34) dell'articolazione metacarpo – falangea è impossibile in quanto bloccata dai legamenti laterali i quali, quando si inseriscono nell'articolazione metacarpo-falangea, risultano tesi durante il movimento di flessione invece durante il movimento di estensione un legamento laterale si tende mentre l'altro si flette permettendo dei movimenti di lateralità di ampiezza variabile tra i 20° e i 40° durante l'estensione (Kapanji,1974).

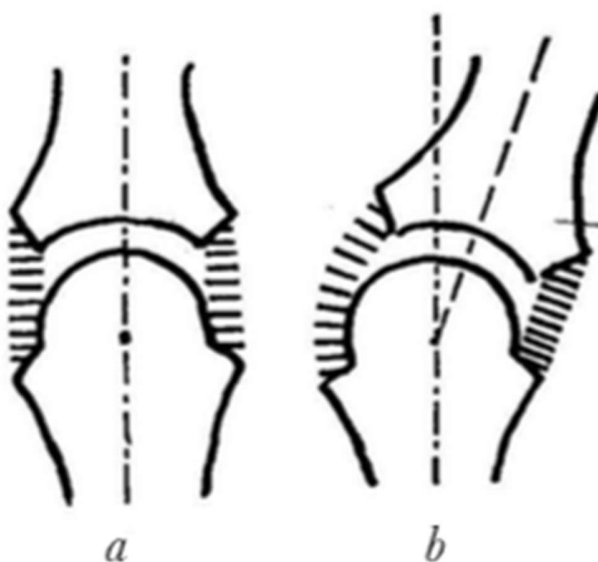


Figura 2.35 Movimenti di lateralità durante l'estensione (a) e la flessione (b) dell'articolazione metacarpo-falangea [6].

Sebbene l'articolazione metacarpo- falangea possieda solo due gradi di libertà, è consentita una rotazione assiale di circa 60° grazie alla lassità legamentosa (Kapanji,1974).

Da studi condotti (Kapanji, 1974) si è osservato che l'indice è il dito che:

- possiede un'ampiezza di flessione pari a 90° e rispetto alle altre dita della mano l'ampiezza maggiore di abduzione -adduzione;
- può eseguire i movimenti di circonduzione, combinando i movimenti di flesso – estensione con quelli di abduzione – adduzione;
- presenta un valore di ampiezza di rotazione assiale interna molto più grande (45°) della rotazione assiale esterna, che invece è quasi nulla.

I movimenti di abduzione-adduzione, circonduzione e rotazione assiale dell'indice sono mostrati in *figura 2.35*.

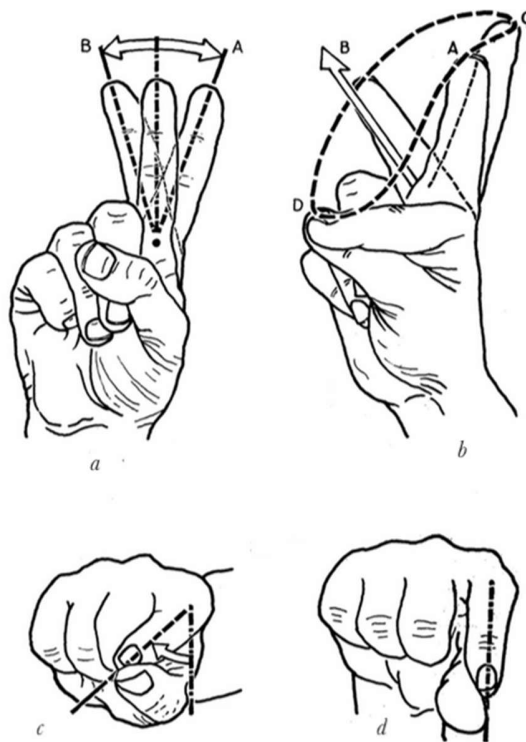


Figura 2.36 (a) Movimenti di lateralità dell'indice, (b) cono di circonduzione, (c) rotazione assiale interna e (d) rotazione assiale esterna [6]

Nel pollice la flessione della metacarpo-falangea del pollice è di 75° - 80° e si effettua intorno all'asse passante per il centro della curvatura antero-posteriore della testa metacarpica, perpendicolare alle sue facce laterali mentre l'estensione è nulla anche passivamente.

I movimenti di lateralità, che teoricamente si effettuano intorno ad un asse antero-posteriore, sono quasi nulli. Il secondo grado di libertà è in realtà praticamente inesistente: questa relativa assenza di movimenti di inclinazione laterale è compensata dalla grande mobilità della trapezio-metacarpica.

La rotazione assiale della prima falange in rapporto al metacarpo esiste sia come movimento attivo che come movimento passivo ed è di fondamentale importanza durante il meccanismo di opposizione del pollice e ha valore pari a 60° - 80° (Kapanji,1974).

I movimenti di flessione, estensione e rotazione assiale del pollice sono mostrati in *figura 2.36*.

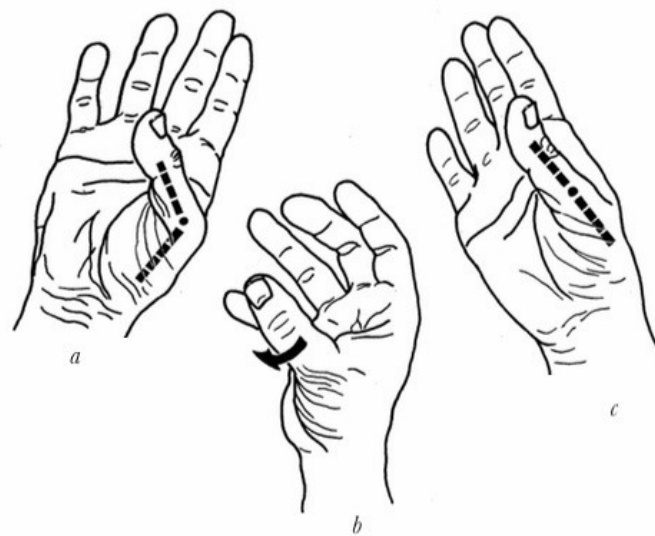


Figura 2.37 Flessione (a), rotazione assiale (b) ed estensione(c) dell'articolazione metacarpo-falangea del pollice [6].

d. Articolazione delle dita (interfalangea)

Le articolazioni interfalangee consentono unicamente il movimento di flesso - estensione nel piano sagittale.

Nelle dita lunghe, come rappresenta la *figura 2.37*, l'ampiezza della flessione delle articolazioni interfalangee cresce dal secondo al quinto dito raggiungendo il valore di 135° a livello del mignolo mentre nelle articolazioni interfalangee distali si raggiungono i 90° a livello dell'indice. L'ampiezza dell'estensione attiva nelle articolazioni inter-falangee è nulla nelle articolazioni prossimali e molto debole (5°) in quelle distali (Kapanji,1974).

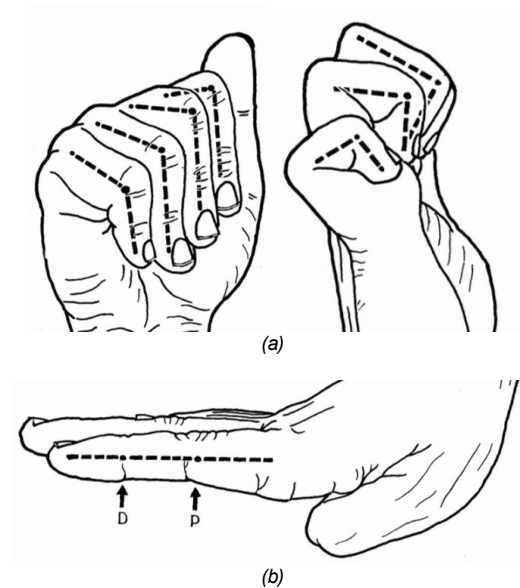


Figura 2.38 (a) flessione nelle articolazioni inter-falangee prossimali e distali, (b) estensione attiva dell'interfalangee prossimali P e distali D [6].

L'estensione passiva come si osserva nella figura 2.38 è nulla a livello dell'interfalangea prossimale (P) e piuttosto marcata, pari a 30° , in quella distale (D) (Kapanji,1974).

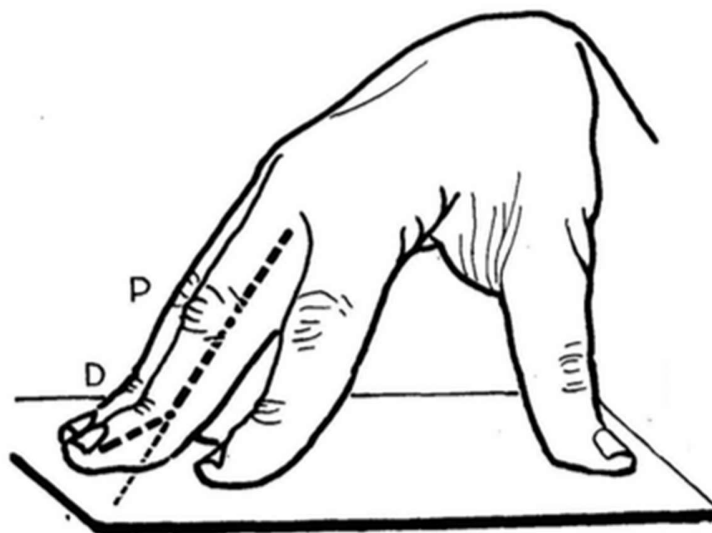


Figura 2.39 Estensione passiva dell'interfalangea prossimale (P) e distale (D) [6].

Nel pollice, la flessione dell'articolazione inter-falangea è compresa tra i 75° e gli 80°. Esiste una leggera estensione attiva compresa tra i 5° e i 10° e soprattutto un'iperestensione passiva che può essere molto pronunciata e pari al valore di 30° (Kapanji,1974).

I movimenti di flessione, estensione e iperestensione sono raffigurati in *figura 2.39*.



Figura 2.40 (a) Flessione, (b) estensione attiva e (c) estensione passiva dell'articolazione interfalangea del pollice [6]

ARTICOLAZIONE	GRADI DI LIBERTÀ	FLESSIONE/ESTENSIONE	ABDUZIONE/ADDUZIONE (movimento di lateralità)	ROTAZIONE
DEL POLSO	2	85°	AB:15° AD:45°	Nulla
CARPO-METACARPICA DELLE DITA LUNGA	Movimenti piuttosto limitati a causa dei legamenti e di una spessa capsula fibrotica			

METACARPO- FALANGEE DELLE DITA LUNGHE	2	$F: \approx 90^\circ$ $E: \begin{cases} \text{attiva} \rightarrow 30^\circ - 40^\circ \\ \text{passiva} \rightarrow \approx 90^\circ \end{cases}$	20°-30°	Anche se posseggono solo due gradi di libertà esiste una rotazione assiale di circa 60°
METACARPO- FALANGEA DEL POLLICE	2	$F: \approx 75^\circ - 80^\circ$ $E: \text{nulla}$	Nulla	Esiste e consente il meccanismo di opposizione del pollice 60°-80°
INTERFALANGEE DELLE DITA LUNGHE	1	Articolazione prossimale $F: 90^\circ - 135^\circ$ $E: \begin{cases} \text{attiva} \rightarrow \approx 0^\circ \\ \text{passiva} \rightarrow \approx 0^\circ \end{cases}$ Articolazione distale $F: \leq 90^\circ$ $E: \begin{cases} \text{attiva} \rightarrow 0^\circ - 5^\circ \\ \text{passiva} \rightarrow \approx 30^\circ \end{cases}$	Nulla	Nulla
INTERFALANGEA DEL POLLICE	1	$F: 75^\circ - 80^\circ$ $E: \begin{cases} \text{attiva} \rightarrow 5^\circ - 10^\circ \\ \text{passiva} \rightarrow 30^\circ \end{cases}$	Nulla	Nulla
TRAPEZIO- METACARPICA DEL POLLICE	3	RoM flessione-estensione 50°-90°	40°-50°	Esiste in conseguenza della lassità della capsula ma non è definito un range

Tabella 5 Gradi di libertà delle articolazioni della mano

2.2.1 I muscoli della mano

I muscoli della mano possono essere suddivisi in tre diverse gruppi: un gruppo laterale che prende il nome di muscoli dell'*eminenza thenar*, un gruppo mediale chiamato muscoli dell'*eminenza ipothenar* ed infine un gruppo di muscoli centrale detto palmare.

1. Il gruppo dell'*eminenza thenar* è formato da:

- **Abduttore breve del pollice** che si origina a partire dal tubercolo dello scafoide e dal legamento trasverso del carpo inserendosi nella parte laterale della falange prossimale del pollice. È il muscolo più superficiale del pollice e con la sua azione abduce il pollice flettendo la falange prossimale.
- **Opponente del pollice** parte dal tubercolo trapezio e si inserisce nel margine radiale del corpo centrale del primo metacarpo; consente l'anteposizione, l'adduzione e la intra-rotazione del primo metacarpo.
- **Flessore breve del pollice** è costituito dal capo superficiale e dal capo profondo che si uniscono in un unico capo fibroso e si inseriscono alla base falange prossimale pollice. Lavora sinergicamente con l'abduttore breve del pollice e consente la flessione della falange prossimale del pollice.
- **Adduttore del pollice** è il muscolo più profondo del complesso del thenar ed è formato da un capo obliquo e da un capo trasverso che si uniscono e si inseriscono sulla superficie mediale della base della falange prossimale del pollice. Con la sua azione consente l'adduzione del pollice in corrispondenza del primo metacarpale.

2. Il gruppo dei muscoli dell'*eminenza ipothenar* comprende:

- il **Palmare breve** che decorre trasversalmente sugli altri tre muscoli dell'*eminenza ipothenar*, si origina dall'uncinato del carpo e si inserisce sulla faccia laterale del quinto metacarpo. Con la sua azione provoca il corrugamento della cute.
- l'**Abduttore del mignolo** che si origina dall'osso pisiforme del carpo e si inserisce nel margine mediale della falange prossimale del mignolo. La sua azione è abduzione della falange prossimale e flettere il quinto dito.
- il **Flessore breve del mignolo** che si origina dal legamento trasverso del carpo in corrispondenza dell'osso uncinato del carpo e si inserisce nella parte mediale della base della falange prossimale del mignolo, consentendo la flessione del mignolo stesso.

- l'**Opponente del mignolo**, il muscolo più profondo del complesso ipotenar, che parte dal complesso dell'uncinato e si instaura lungo il quinto metacarpale, flettendo e abducendo il mignolo.

3. Il *complesso palmare* è formato dai muscoli lombricali e da quelli interossei.

- I **muscoli lombricali** sono quattro, piccoli e disposti tra i tendini del muscolo flessore profondo delle dita. Ognuno di questi muscoli si innesta sulla rispettiva faccia dorsale della falange prossimale delle dita e con la loro azione flettono le articolazioni metacarpo-falangee ed estendono le articolazioni interfalangee prossimali e distali.
- I **muscoli interossei** sono disposti tra le ossa metacarpali e possono essere suddivisi in palmari e dorsali.

Gli interossei palmari sono tre piccoli muscoli: il primo interosseo palmare si origina dalla faccia mediale del secondo metacarpo mentre il secondo e il terzo interosseo si originano dalla faccia laterale rispettivamente del quarto e del quinto osso metacarpale. Rimangono in stretto contatto con le articolazioni metacarpo - falangee e contraendosi consentono la flessione della prima falange, l'estensione della seconda e terza falange e inoltre permettono l'avvicinamento delle dita tra di loro.

Gli interossei dorsali sono quattro piccoli muscoli pennati che riempiono gli spazi interossei tra i metacarpi. Si originano dalle due facce delle ossa metacarpali che delimitano lo spazio interosseo. I loro fasci si dirigono in basso, proseguendo in un tendine che si divide in due parti: la parte breve s'inserisce alla base della prima falange mentre la parte più lunga si espande sul tendine del muscolo estensore comune delle dita

Con la loro azione flettono la prima falange, estendono le altre due e contraendosi allontanano le dita tra di loro.

Tutti i muscoli della mano sono rappresentati in *figura 2.40*.

Legenda dei muscoli della mano

1. Muscolo Flessore Profondo delle Dita
2. Muscolo Flessore Lungo del Pollice
3. Muscolo Retinacolo dei Flessori
4. Muscolo Abductore del Mignolo
5. Muscolo Abductore Breve del Pollice
6. Muscolo Palmare Breve
7. Muscolo Flessore Breve del Pollice
8. Muscolo Flessore del Mignolo
9. Muscolo Opponente del Pollice
10. Muscoli interossei Palmari e Dorsali
11. Muscolo Adduttore del Pollice
12. Muscoli Lombricali
13. Muscoli Interossei Dorsali della Mano

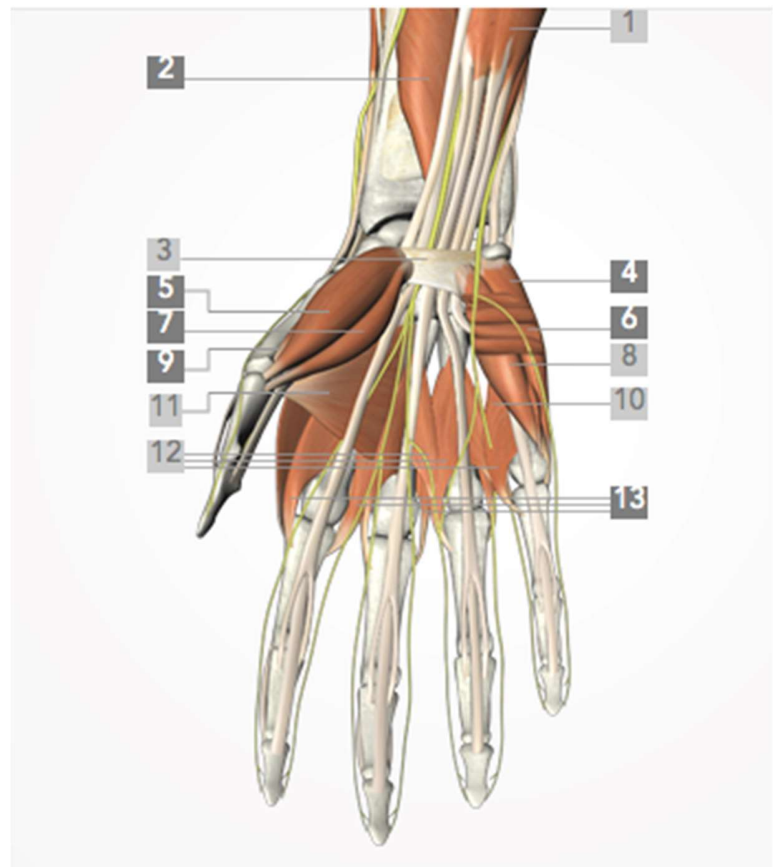


Figura 2.41 Muscoli della mano [14]

3 *Il Nerve Transfer*

In questo capitolo verrà descritto l'intervento del nerve transfer, che consiste nel trasferire nervi di un muscolo sano, situato a monte della lesione midollare e chiamato donatore, a un muscolo ricevente che, in seguito alla lesione, non presenta più nervi funzionanti. L'operazione si propone di ripristinare il controllo volontario della funzione mancante come l'estensione del gomito, l'estensione del polso e/o le funzioni della mano. In questo capitolo saranno analizzate le tipologie di operazione di nerve transfer e di soggetti candidati a questa operazione.

3.1 *La tetraplegia e il Nerve Transfer*

Si definisce *tetraplegia* una lesione a livello cervicale della spina dorsale, spesso causata da incidenti automobilistici o da cadute dall'alto, a cui si associa la perdita della forza muscolare in tutti e quattro gli arti. Il paziente viene sottoposto ad un esame neurologico, che consiste in test sensitivi, motori e dell'area sacrale, permettendo di identificare l'estensione e la gravità della lesione sulla base della scala A.S.I.A (American Spinal Injury Association) [15].

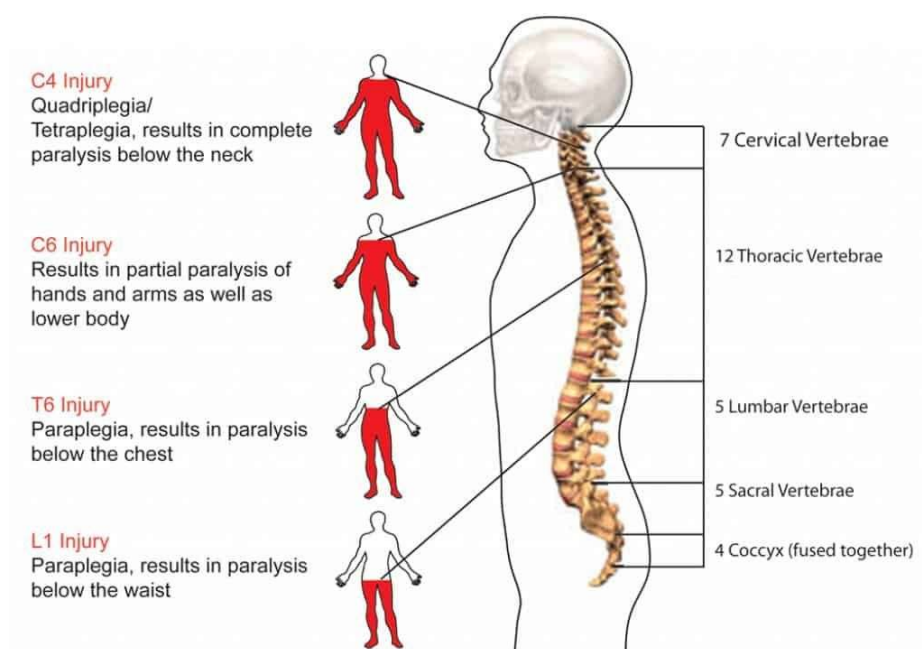


Figura 3.1 Differenza tra tetraplegia e paraplegia [16]

Durante la valutazione clinica sono classificati i muscoli in base alla forza che generano, in accordo con la scala graduata stilata dal Medical Research Council del Regno Unito [17]: un muscolo viene considerato funzionale se la sua capacità di sviluppare forza è pari o superiore al valore 4.

<i>GRUPPO</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
0	Nessuna contrazione
1	Contrazione muscolare visibile associata a un movimento dell'arto limitato o assente
2	Movimento dell'arto, ma non contro gravità
3	Movimento attivo contro gravità, ma non contro resistenza
4	Movimento almeno contro la resistenza fornita dall'esaminatore
5	Forza piena

Tabella 6 Classificazione della forza muscolare

Esiste una classificazione clinica e funzionale, stilata dall' ICSHT (International Classification for Surgery of the Hand in Tetraplegia) [18], del paziente tetraplegico che guida i chirurghi nella scelta della strategia chirurgica.

<i>GRUPPO MOTORE</i>	<i>MUSCOLO FUNZIONANTE</i>	<i>FUNZIONE</i>
0	Nessun muscolo sotto il gomito è adatto al trasferimento	/
1	Brachioradiale (BR)	Flessione e supinazione del gomito
2	Estensore Radiale Lungo del Carpo (ECRL)	Estensione del polso

3	Estensore Radiale Breve del Carpo (ECRB)	Estensione del polso
4	Pronatore Rotondo (PT)	Pronazione del polso
5	Flessore Radiale del Carpo (FCR)	Flessione del polso
6	Estensore delle Dita	Estensione estrinseca delle dita
7	Estensore del pollice	Estensione estrinseca del pollice
8	Flessore digitali parziali	Flessione estrinseca delle dita (parziale)
9	Mancano solo gli elementi intrinseci	Flessione dita
10	Eccezioni	/

Tabella 7 Classificazione della lesione in base al numero di muscoli che rimangono funzionali sotto il gomito

Per le persone tetraplegiche è di fondamentale importanza riuscire a recuperare, anche parzialmente, la funzionalità delle braccia e delle mani: ciò consente un miglioramento delle loro condizioni di vita, in termini di indipendenza, rispetto ad alcune attività della vita quotidiana. La funzionalità dell'arto superiore può essere migliorata mediante l'operazione di nerve transfer, che consiste nel trasferire nervi di un muscolo sano, situato a monte della lesione midollare e chiamato donatore, a un muscolo ricevente che in seguito alla lesione non presenta più nervi funzionanti. Se l'intervento ha esito positivo, è possibile innervare nuovamente distretti muscolari che altrimenti non sarebbero recuperabili e riacquisire il controllo funzionale degli arti superiori sia in termini motori che sensoriali.

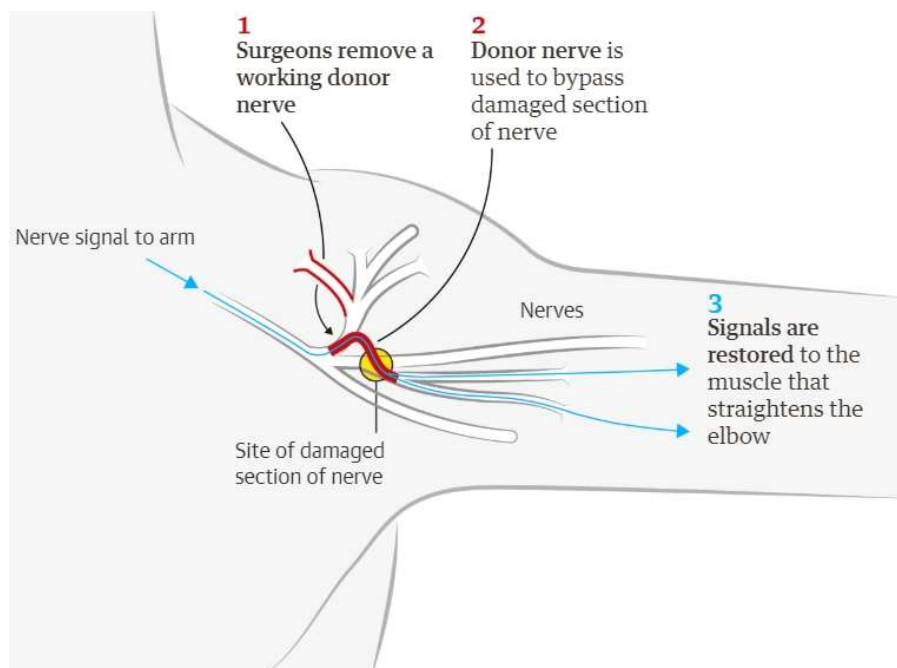


Figura 3.1 Le fasi dell'intervento: viene prelevato un nervo sano che viene usato per fare da ponte tra la sezione di nervo danneggiata e il muscolo paralizzato. [19]

I pazienti candidati all'operazione di nerve transfer devono rispettare i seguenti requisiti [20]:

- presentare una lesione del rachide cervicale che comporti una paralisi parziale di uno o di entrambi gli arti superiori;
- avere un muscolo donatore e uno agonista con forza muscolare almeno pari a 4 per ridurre al minimo il rischio di deficit dell'azione del donatore;
- non presentare alcuna attività volontaria dei muscoli riceventi;
- avere un Range Of Motion (RoM) articolare conservato;
- possedere una assente o lieve spasticità;
- essere privi di infezioni, contratture e dolori;
- essere consapevoli: è importante definire gli obiettivi insieme al paziente.

3.2 Tipologie di Nerve Transfer

Esistono diverse tipologie di nerve transfer, riportate in *tabella 8*, che possono essere effettuate in contemporanea o separatamente in base alla funzione che si vuole ristabilire nel paziente.

TIPOLOGIE DI NERVE TRANSFER IN SEGUITO A LESIONE MIDOLLARE			
	FUNZIONE	NERVE TRANSFER	RISULTATI E LETTERATURA
GOMITO	ESTENSIONE	Piccolo pro tricipite	I gruppi Bertelli e van Zyl riportano alcune funzioni del tricipite con forza muscolare pari a 4 senza declassamento della funzione della spalla [21], [22]
		Un ramo deltoide del nervo ascellare a un ramo tricipite del nervo radiale	Bertelli mostra che 5/7 soggetti riacquistano la funzione con forza muscolare pari 4 e 2/7 la funzione con forza muscolare pari a 3. [23]
POLSO	ESTENSIONE	Il ramo brachiale del nervo muscolocutaneo viene trasferito all'estensore radiale lungo del carpo (ECRL).	Estensione antigravitazionale del polso a 5 mesi dall'intervento, con conseguente tenodesi ⁸ della funzione della mano [24]
		Il ramo supinatore del nervo radiale viene utilizzato per trasferire al ramo dell'estensore ulnare del carpo (ECU).	Trasferimento selettivo non consigliato; il trasferimento al PIN nel suo insieme è più utile e gli estensori delle dita, che attraversano il polso, possono servire ad aumentare l'estensione debole del polso. [23]
MANO	ESTENSIONE	Brachiale pro AIN ⁹	Risultati promettenti [22] [23] [25] [26]
		Il ramo brachioradiale del nervo muscolocutaneo all'AIN.	Si preferisce preservare il brachioradiale come donatore per le opzioni di trasferimento tendineo di salvataggio per ripristinare la funzione di pinch.

⁸ Particolare tipo di intervento che viene eseguito in chirurgia ortopedica e che consiste nel fissare un tendine muscolare all'osso.

⁹ Si origina dal nervo mediano, che nell'avambraccio si suddivide in nervo interosseo anteriore con il compito di innervare il muscolo flessore lungo del pollice, il muscolo pronatore quadrato e la metà radiale del muscolo flessore profondo delle dita della mano, e il nervo palmare cutaneo con funzioni sensitive

		Il nervo dell'estensore radiale breve del carpo all'AIN	Essendo vicino al muscolo bersaglio sono stati riportati buoni risultati. Tuttavia, si preferisce evitare l'intervento in quanto preclude futuri trasferimenti di tendinei di salvataggio utilizzando ECRL come donatore per ripristinare la flessione del dito. [27] [28]
	FLESSIONE	Supinatore pro interosseo posteriore (PIN) ¹⁰	Ripristina la funzione di: - Abduttore breve del pollice (APB) - Estensore del pollice lungo (EPL) - Estensore dell'indice (EIP) - Estensore comune delle dita (EDC) Nerve Transfer consolidato ed affidabile. [29] [30]

Tabella 8 Tipologie di Nerve Transfer

In questo capitolo saranno approfondite solo le tipologie di Nerve Transfer attualmente effettuate presso l'ospedale C.T.O di Torino.

1. Piccolo Rotondo pro Tricipite

Il nervo del ramo motorio del piccolo rotondo, muscolo che consente la extra-rotazione di spalla, è prelevato e collegato al nervo motorio della testa lunga del tricipite consentendo il ripristino dell'estensione dell'avambraccio. Il muscolo sottospinato compensa qualsiasi deficit di rotazione esterna conseguente al sacrificio dell'innervazione del piccolo rotondo.

¹⁰ si origina dal nervo radiale, il quale nell'avambraccio si separa in una branca superficiale che è una diramazione nervosa con funzioni sensitive e in una quella profonda che è una diramazione nervosa con funzioni motorie.

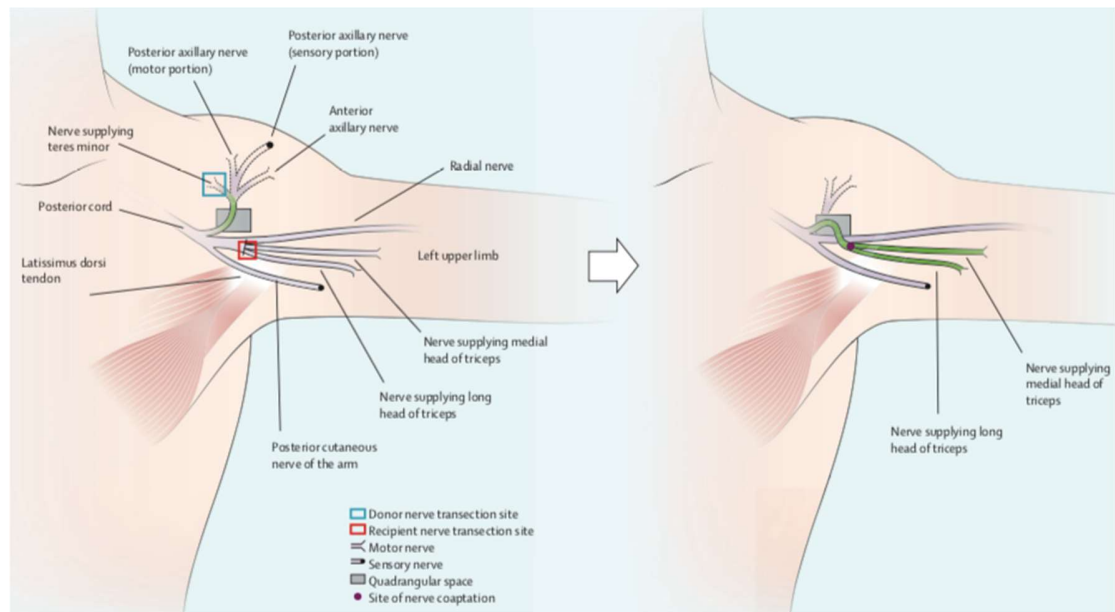


Figura 3.2 Nerve Transfer Piccolo Rotondo pro Tricipite [31]

2. *Supinatore pro Interosseo Posteriore*

Il nervo radiale che innerva il muscolo supinatore (*figura 3.3*) viene prelevato e collegato al nervo interosseo posteriore (PIN). La procedura di nerve transfer supinatore pro interosseo posteriore è mostrata in *figura 3.4*.

Se l'intervento ha esito positivo, il paziente riuscirà nuovamente ad estendere le falangi prossimali (dita a grip). La funzione di supinazione è comunque garantita grazie all'azione del muscolo bicipite.

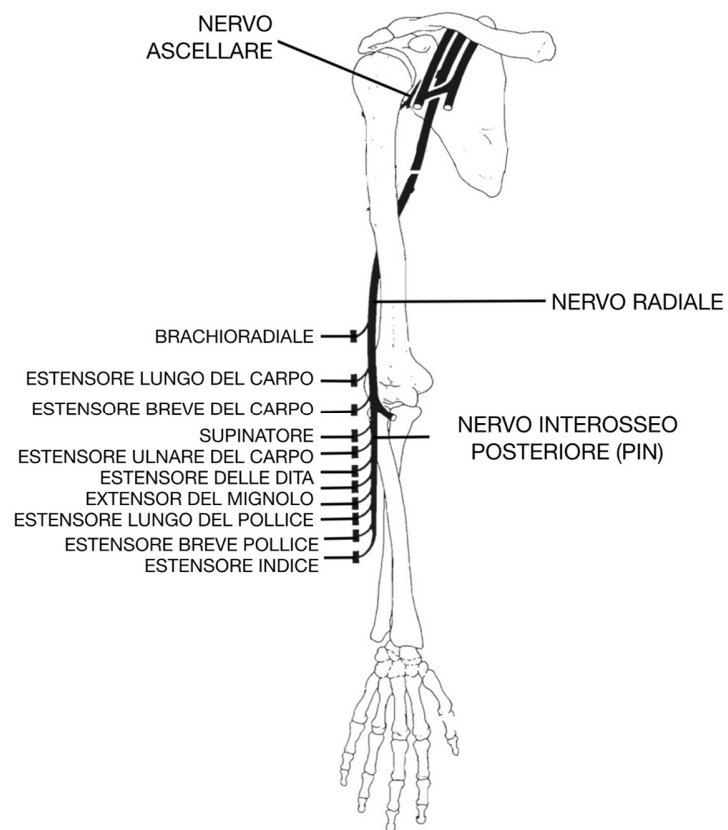


Figura 3.3 Nervo Ascellare, Radiale, Interosseo Posteriore con i rispettivi muscoli innervati [32]

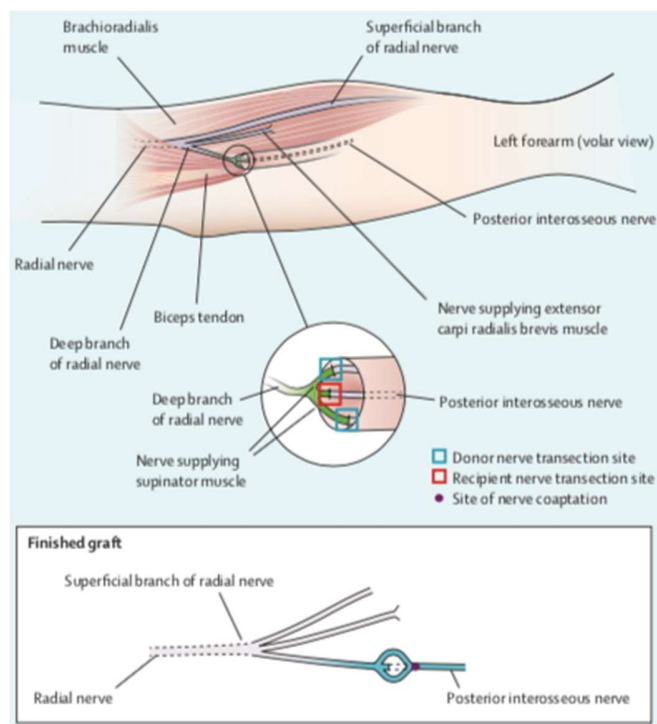


Figura 3.4 Nerve Transfer Supinatore pro Interosseo Posteriore [31]

3. *Brachiale pro Interosseo Anteriore.*

Il nervo muscolocutaneo, che decorre lungo il braccio innervando il brachiale, viene isolato e connesso al nervo interosseo anteriore (AIN); la *figura 3.5* mostra il nervo mediale e il nervo interosseo anteriore con i rispettivi muscoli innervati.

Mediante questo intervento di nerve transfer il paziente può recuperare la flessione delle falangi distali dell'indice e del pollice. La funzione di flessione del gomito è comunque garantita dall'azione del brachioradiale e del bicipite brachiale.

In *figura 3.6* è possibile osservare le fasi dell'intervento di nerve transfer del brachiale pro interosseo anteriore.

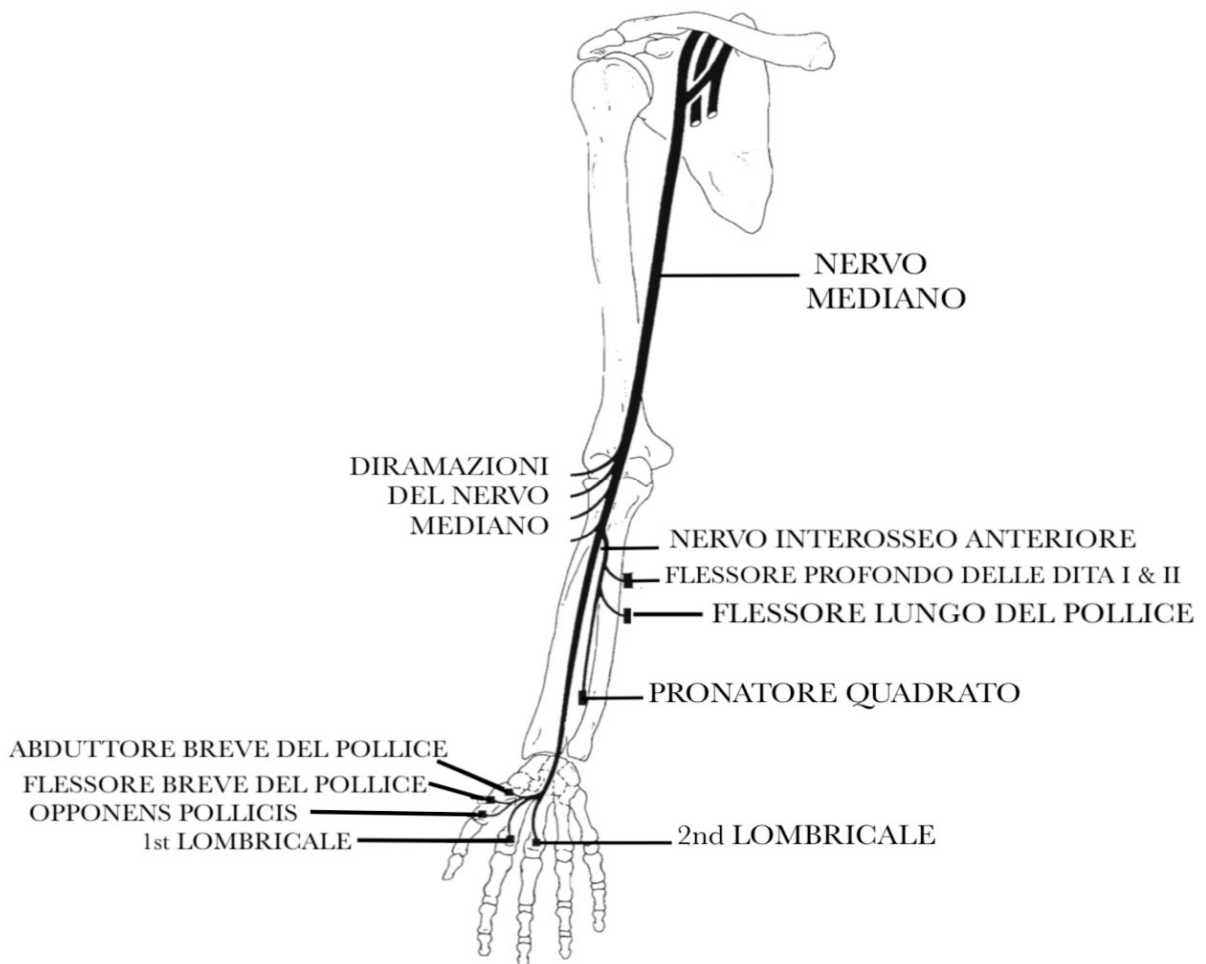


Figura 3.5 Nervo Mediano, Nervo Interosseo Anteriore con i rispettivi muscoli innervati [32]

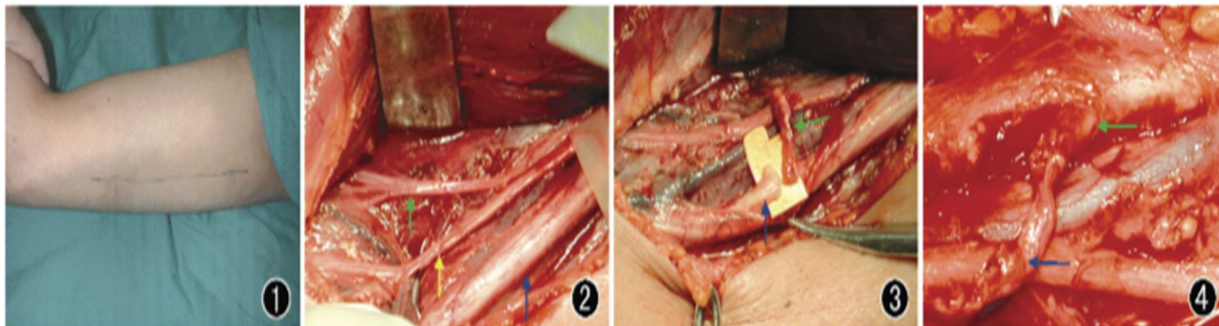


Figura 3.6 (1) incisione; (2) Identificazione del nervo muscolocutaneo (freccia verde), del nervo mediale (freccia blu) e del nervo antebrachiale laterale (freccia gialla); (3) trasferimento del nervo muscolocutaneo del brachiale al gruppo posteriore del nervo mediale per ricostruire la flessione delle dita; (4) Anastomosi dei due nervi. [33]

Recentemente, come descritto dal Dott. Titolo e dai suoi colleghi [34], sono state proposte delle nuove strategie chirurgiche che associano l'intervento di nerve transfer con gli interventi tradizionali come il trasferimento tendineo¹¹ [35], la tenodesi o l'artodesi¹². Queste nuove strategie chirurgiche potrebbero migliorare e completare le attuali strategie chirurgiche garantendo un maggiore recupero delle funzionalità della mano. In caso di fallimento del trattamento proposto, è sempre possibile ricorrere al trattamento chirurgico convenzionale.

In accordo con la classificazione dell'ICSHT, i pazienti tetraplegici sono stati suddivisi in nove sottogruppi [34] e per ognuno di loro è stata proposta una strategia chirurgica. Ogni gruppo differisce per il livello di lesione del midollo spinale e per i muscoli ancora funzionanti dopo la lesione stessa.

GRUPPO 0

I pazienti appartenenti a questo sottogruppo presentano una lesione del midollo spinale a livello C_5 o superiore pertanto non presentano nessun muscolo con forza superiore o uguale al valore 4 al di sotto del gomito. Si esegue l'intervento di nerve transfer piccolo rotondo pro tricipite, al fine di recuperare l'estensione del gomito; qualora l'intervento non avesse esito positivo è si può procedere con l'intervento tradizionale (trasferimento tendineo).

¹¹ Procedura mediante la quale un tendine precedentemente isolato può essere collegato con punti di sutura alla parte distale dei tendini danneggiati. Il grado di tensione da dare ai tendini, a sutura ultimata, deve essere tale che essi si presentino leggermente ipercorretti, dato che con il tempo il tendine tende leggermente ad allentarsi.

¹² Operazione chirurgica di fusione degli elementi ossei che compongono un'articolazione mobile o semimobile del corpo umano.

GRUPPO 2

La lesione del midollo spinale è a livello della vertebra cervicale C_5 , solo il muscolo brachioradiale presenta una forza superiore o uguale al valore 4: la flessione del gomito è preservata. Si procede con gli interventi di nerve transfer piccolo rotondo pro tricipite e brachiale pro interosseo anteriore, in modo da recuperare l'estensione del gomito, migliorare la presa e la funzione intrinseca della mano. Contemporaneamente si effettua un trasferimento tendineo del brachioradiale all'estensore radiale breve del carpo per ripristinare l'estensione attiva del polso.

GRUPPO 2

In questo caso la lesione è a livello C_6 : sia il brachioradiale che l'estensore radiale lungo del carpo sono funzionanti. Si effettuano contemporaneamente tutti e tre gli interventi di nerve transfer al fine di ripristinare una presa più efficace e consentire l'estensione e la flessione attiva delle dita.

Se il trasferimento del ramo del nervo motore dal brachiale all'interosseo anteriore produce un buon risultato, può essere effettuato anche un trasferimento del tendine brachioradiale, per migliorare l'opposizione del pollice. In caso di fallimento dei tre nerve transfer si può procedere con gli approcci convenzionali.

GRUPPO 3

In questo caso la lesione è a livello C_6 : oltre al brachioradiale entrambi gli estensori radiali del carpo sono funzionanti. Oltre ai tre interventi di nerve transfer, si effettuano anche trasferimenti tendinei dall'estensore radiale lungo del carpo ai flessori profondi delle dita, con l'obiettivo di riuscire a ripristinare la funzione di flessione delle altre dita lunghe della mano.

In caso di fallimento dei tre nerve transfer si può procedere con il trasferimento tendinei.

GRUPPO 4

La lesione del midollo spinale dei pazienti di gruppo 4 è a livello C_6 ; essi presentano il pronatore rotondo funzionante. La strategia chirurgica prevede i trasferimenti nervosi dal supinatore all'interosseo posteriore e dal brachiale all'interosseo posteriore e il trasferimento tendineo dall'estensore lungo del carpo al flessore profondo delle dita, per cercare di ripristinare la flessione delle dita lunghe. In questo caso il

trasferimento del ramo motorio del piccolo rotondo al tricipite non è necessario perché il tricipite è ancora abbastanza funzionale.

GRUPPO 5

I pazienti appartenenti al gruppo 5 presentano una lesione midollare a livello della vertebra cervicale C_7 e presentano il muscolo flessore radiale del carpo con valore di forza pari a 4 o 5. La strategia chirurgica proposta è identica a quella usata nei pazienti appartenenti al gruppo 4.

GRUPPO 6

I tetraplegici appartenenti a questo sottogruppo presentano la lesione a livello C_7 con il muscolo dell'estensore comune delle dita in grado di generare una forza pari o superiore al valore 4; è necessario ripristinare solo il funzionamento dei muscoli flessori. Questi pazienti inoltre hanno un buon controllo sia delle spalle che dei gomiti.

Si procede con l'intervento di nerve transfer del brachiale pro interosseo anteriore per recuperare la flessione del pollice e dell'indice, con il trasferimento tendineo per consentire la flessione delle altre dita lunghe della mano e con la procedura della tenodesi dell'estensore lungo del pollice per consentire l'estensione del pollice in seguito alla flessione del polso.

GRUPPO 7

La lesione midollare è sempre a livello C_7 ma in questo caso sia gli estensori delle dita che quelli del pollice sono forti; è necessario solo il recupero dei flessori. Viene proposta una procedura che prevede il trasferimento nervoso dal brachiale al nervo interosseo anteriore e il trasferimento del tendine dall'estensore radiale lungo del carpo al flessore profondo delle dita; in questo modo si cerca di ripristinare la flessione delle dita della mano.

Per incrementare il miglioramento della flessione delle dita sono stati proposti anche degli ulteriori trasferimenti tendinei.

GRUPPO 8

Questi pazienti presentano una lesione a livello C_8 ma posseggono ancora una parziale flessione delle dita.

Si propone il trasferimento di un ramo nervoso dall'estensore radiale breve del carpo all'interosseo anteriore così da migliorare la flessione delle dita. Se questa procedura fallisce, è comunque ancora utilizzare le tecniche tradizionali.

GRUPPO 9

Questi pazienti presentano i muscoli flessori ed estensori delle dita funzionanti ma mancano di innervazione muscolare intrinseca. Si procede con le procedure convenzionali, a seconda del livello di squilibrio intrinseco presente.

Tempistiche di intervento

L'intervento di nerve transfer deve essere effettuato in un lasso temporale variabile compreso tra i 6 e i 12 mesi dopo il trauma, dopo che sia avvenuto tutto il possibile recupero neurologico spontaneo ma prima dell'inizio dell'atrofia muscolare irreversibile. È possibile intervenire in un tempo precedente ai 6 mesi dalla lesione solo se l'elettromiografia (EMG) dimostra denervazione muscolare. [36]

Riabilitazione

La riabilitazione [20] è un processo lungo in quanto la reinnervazione muscolare è un processo lento (velocità di reinnervazione è circa 1-2 mm/die): è necessario fornire al cervello il tempo adeguato per imparare nuovamente ad usare il muscolo.

Prima che possa comparire qualche movimento visibile e misurabile del muscolo ricevente può trascorrere un tempo compreso tra qualche mese fino ad un anno.

La **prima fase riabilitativa** inizia subito dopo l'intervento e prosegue per le successive tre settimane. Per la prima settimana il paziente deve mantenere il braccio immobilizzato secondo le indicazioni del chirurgo; a partire dalla seconda settimana dall'intervento il paziente deve iniziare a mobilizzare passivamente le articolazioni per 2-3 volte al giorno.

La **seconda fase riabilitativa** richiede l'esecuzione di tre diverse tipologie di esercizi:

1. il primo esercizio prevede che il paziente svolga l'azione del donatore nel suo completo range of motion (RoM);

2. il secondo esercizio il paziente deve svolgere l'azione del donatore e contemporaneamente immaginare e/o tentare di svolgere il movimento del ricevente sia senza che contro resistenza al movimento del donatore;
3. il terzo esercizio il paziente effettua autonomamente il movimento del donatore e quello del ricevente mediante l'ausilio del fisioterapista.

▪ RAMO PER IL PICCOLO ROTONDO PRO RAMO PER IL CAPO LUNGO DEL TRICIPIDE BRACHIALE

- a. Svolgere l'azione del donatore (extrarotazione di spalla) nel suo completo range of motion, come mostrato in figura 3.7



Figura 3.7 Movimento di extrarotazione di spalla nel suo RoM

- a. Svolgere l'azione del donatore (extrarotazione di spalla) e contemporaneamente immaginare di svolgere il movimento del ricevente (estensione gomito). L'esercizio va eseguito sia senza che contro resistenza alla extrarotazione della spalla. (figura 3.8 e 3.9)
- b. Svolgere l'azione del donatore (extrarotazione di spalla) e associato al tentativo di estensione del gomito mentre il fisioterapista esegue il movimento del ricevente. L'esercizio va eseguito sia senza che contro resistenza alla extrarotazione della spalla.



Figura 3.8 Movimento donatore (extrarotazione di spalla) associato al movimento del ricevente (estensione gomito) senza resistenza



Figura 3.9 Movimento donatore (extrarotazione di spalla) associato al movimento del ricevente (estensione gomito) contro resistenza

- RAMO PER IL BRACHIALE PRO INTEROSSEO ANTERIORE
 - a. Svolgere l'azione del donatore (flessione del gomito) nel suo completo range of motion mantenendo l'avambraccio in pronazione. (figura 3.10)



Figura 3.10 Movimento di flessione del gomito nel suo RoM

- b. Svolgere l'azione del donatore (flessione gomito ad avambraccio pronato) e contemporaneamente immaginare di svolgere il movimento del ricevente (flessione primo e secondo dito).

L'esercizio va eseguito sia senza che contro resistenza alla flessione del gomito.

- c. Svolgere l'azione del donatore (flessione gomito ad avambraccio pronato) associato al tentativo di flessione primo e secondo dito mentre il fisioterapista esegue il movimento del ricevente, come mostrato in *figura 3.11*.



Figura 3.11 Movimento donatore (flessione gomito) associato al movimento del ricevente (flessione I e II dito)

■ RAMO PER IL SUPINATORE PRO INTEROSSEO POSTERIORE

- a. Svolgere l'azione del donatore (supinazione braccio) nel suo completo range of motion. (*figura 3.12*)



Figura 3.12 Movimento di supinazione del braccio nel suo RoM

- b. Svolgere l'azione del donatore (supinatore) e contemporaneamente immaginare di svolgere il movimento del ricevente (estensione dita/apertura mano).

L'esercizio va eseguito sia senza che contro resistenza alla supinazione del braccio.

- c. Svolgere l'azione del donatore (supinatore) associato al tentativo di estensione dita mentre il fisioterapista esegue il movimento del ricevente (*figura 3.13*)



Figura 3.13 Movimento di supinazione del braccio associato all'estensione delle dita

In tutti i casi studiati, anche se è il fisioterapista ad eseguire il movimento, è fondamentale che il paziente continui a immaginare di effettuare il movimento. Questi esercizi di attivazione vanno eseguiti dalle 3 -5 volte al giorno per 10 ripetizioni per ogni movimento.

La *figura 3.14* rappresenta l'iter che il paziente deve seguire da quando arriva in ospedale a quando viene operato con i conseguenti steps di analisi del recupero funzionale dell'arto superiore e gli esercizi di riabilitazione.

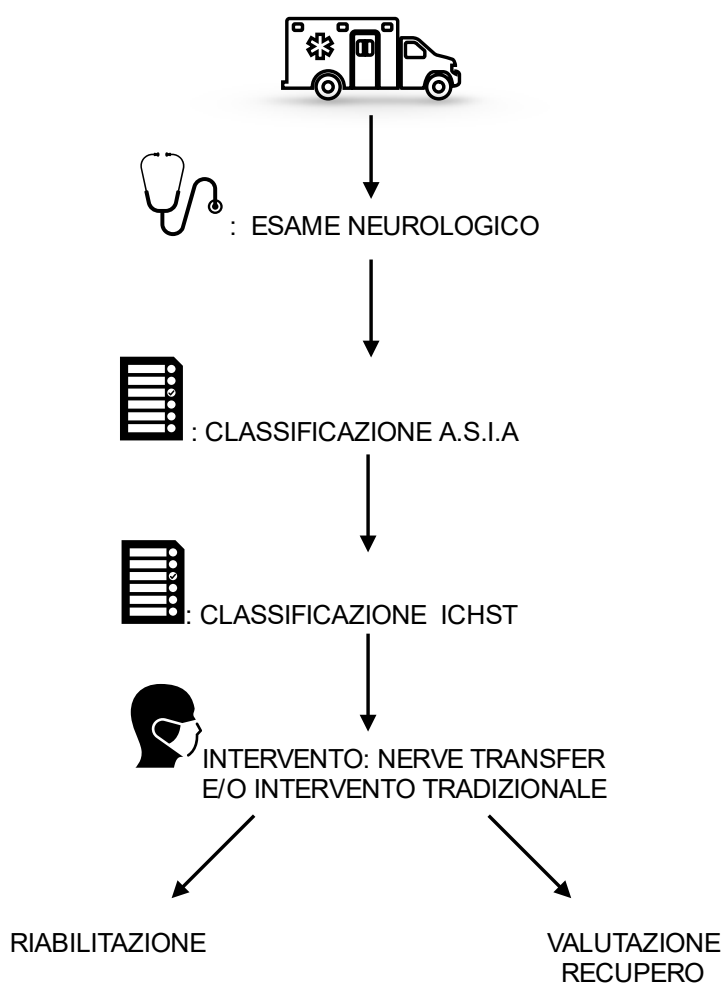


Figura 3.14 Iter del paziente

Il seguente lavoro di tesi si pone come obiettivo di sviluppare un modello cinematico dell'arto superiore che comprenda anche la mano e che possa essere usato per valutare il range of motion (RoM) delle

articolazioni e per testare il recupero del movimento in pazienti che hanno subito l'operazione di nerve transfer. Dal momento che la mano viene modellizzata in maniera dettagliata nei suoi vari gradi di libertà di movimento, il modello finale risulta piuttosto complesso; al fine di effettuare una valutazione clinica esso può essere semplificato e adatto al singolo paziente.

4 Modelli biomeccanici della mano

L'analisi condotta in letteratura che ha l'obiettivo di comprendere, innanzitutto, come modellizzare da un punto di vista cinematico la mano: essa viene solitamente descritta come una catena cinematica seriale in cui le articolazioni sono rappresentate da giunti con n gradi di libertà dai quali dipende il movimento dei link della mano. La seconda parte dell'analisi in letteratura ha lo scopo di capire sia il numero e il posizionamento corretto dei marker sia come determinare il sistema di riferimento locale della mano al fine di poter creare un modello funzionale, analizzando i parametri cinematici ricavati dai marker, e applicabile ad analisi cliniche. Nei paragrafi che seguono verrà presentata la ricerca in letteratura effettuata soffermandosi sulla tipologia del modello cinematico, descrivendone il numero di gradi di libertà dei giunti e i vincoli imposti, sul numero e posizionamento dei marker, sul posizionamento del sistema di riferimento locale e sullo scopo dell'analisi.

4.1 Modelli biomeccanici in letteratura

In questo capitolo sono stati riportati solo gli articoli più significativi tra i vari articoli analizzati. La ricerca bibliografica è stata condotta inizialmente con l'obiettivo di capire i vari gradi di libertà della mano e come definire gli assi di riferimento delle dita lunghe della mano e del pollice. Inoltre, dal momento che il modello cinematico è stato sviluppato con l'obiettivo di testare il recupero del movimento in pazienti che hanno subito l'operazione di nerve transfer, la ricerca è stata indirizzata verso studi che avessero analizzato i movimenti delle mani mediante un sistema optoelettronico così da poter reperire informazioni anche sul posizionamento dei markers e sul volume di cattura necessario a riuscire a visualizzare i movimenti fini delle mani. Per effettuare questa ricerca sono state inserite nel motore di ricerca le seguenti parole chiave: *hand kinematic model, finger kinematics, finger movements, hand motion, 3D motion, biomechanics, optoelectronic system, passive markers, Vicon motion capture, Vicon system ...* Gli articoli analizzati per comprendere il posizionamento delle telecamere e l'ampiezza del volume di cattura verranno approfonditi successivamente nel *capitolo 5.1.1*.

4.1.1 “Model-based analysis of hand posture” (Lee and Kunii, 1995) [37]

Lo studio condotto da Lee e Kunii si proponeva di creare un modello cinematico che potesse analizzare la postura 3D della mano.

Partendo dal modello anatomico della mano è stato definito un modello cinematico della mano dove ad ogni articolazione con n gradi di libertà è associato un giunto con numero di gradi di libertà pari al movimento consentito. Le articolazioni interfalangee distali (DIP) e prossimali (PIP) delle dita sono approssimate ad un giunto con un grado di libertà, che consente unicamente flessione/estensione attorno ad un asse; le articolazioni metacarpo - falangea (MCP) delle dita presentano due gradi di libertà in quanto oltre alla flessione/estensione consentono anche il movimento di abduzione/adduzione. Le articolazioni interfalangee (IP) e metacarpo falangee (MCP) del pollice sono approssimabili con giunti a un grado di libertà mentre la trapezio metacarpale (TM) è approssimata a un giunto con due gradi di libertà. Per quanto riguarda il polso, esso viene approssimato come un giunto sferico che oltre ai movimenti di flessione/estensione e abduzione/adduzione consente anche quello di torsione.

Complessivamente le dita presentano 21 gradi di libertà; i gradi di libertà del polso solitamente non vengono considerati quando si analizza il movimento delle singole dita.

Nel determinare il modello cinematico, gli autori hanno identificato un sistema di riferimento locale per le dita e per il pollice in modo che fosse possibile analizzare il movimento della mano in termini di rotazione attorno a uno dei tre assi. (figura 4.1)

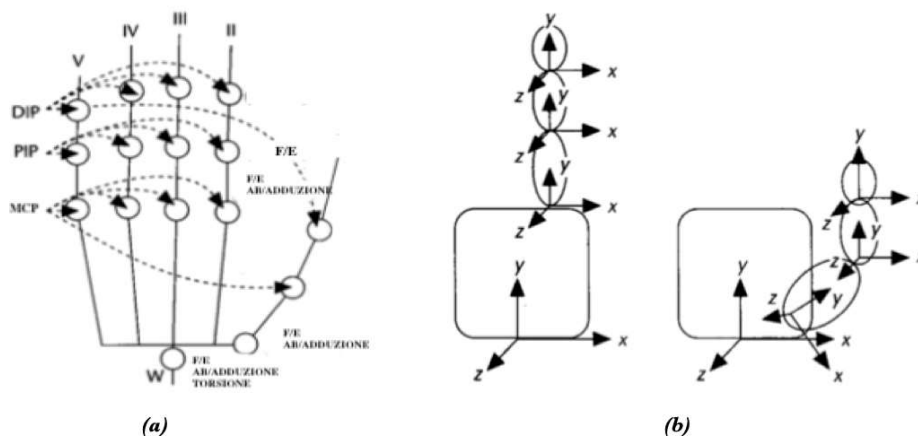


Figura 4.1 (a) Modello cinematico della mano, (b) Sistema di riferimento locale per le dita e per il pollice [37]

La mano e le dita, durante il movimento, sono vincolate così da non consentire gesti arbitrari. La tipologia dei vincoli applicati al modello è descritta accuratamente nell'articolo [38]; in questa

trattazione i vincoli sono suddivisi in *vincoli statici*, *vincoli dinamici* e i *vincoli riguardanti i movimenti comuni e naturali*.

I *vincoli statici* limitano i movimenti delle dita rispetto all'anatomia della mano e sono descritti dalle seguenti disequazioni:

$$0^\circ \leq \theta_{MCP_FLESS} \leq 90^\circ$$

$$0^\circ \leq \theta_{PIP_FLESS} \leq 110^\circ$$

$$0^\circ \leq \theta_{DIP_FLESS} \leq 90^\circ$$

$$-15^\circ \leq \theta_{AB/AD} \leq 15^\circ$$

Inoltre i movimenti di abduzione/adduzione del dito medio sono così piccoli da poter essere approssimati al valore nullo. Ciò determina una riduzione dei gradi di libertà associati alla mano che da 21 si riducono a 19.

$$\theta_{MCP_AB/AD(III)} = 0^\circ$$

$$\theta_{TM_AB/AD} = 0^\circ$$

I *vincoli dinamici* sono i vincoli imposti sui giunti quando le dita si muovono; a loro volta possono essere classificato in vincoli intra e interfalangei.

I vincoli interfalangei sono imposti tra le articolazioni dello stesso tipo: se in un dito si muove l'articolazione interfalangea distale (DIP) allora anche la prossimale si muoverà secondo la seguente relazione:

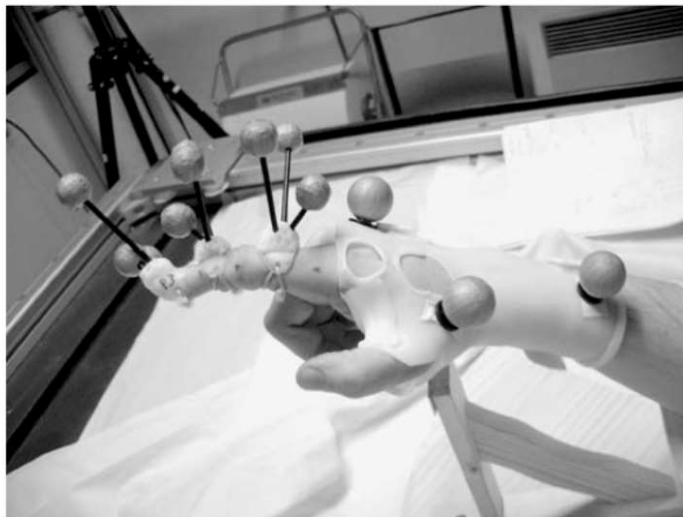
$$\theta_{DIP} = \frac{2}{3} \theta_{PIP}$$

Infine sono definiti i vincoli che riguardano i movimenti comuni e naturali che, anche se differiscono tra le persone, sono simili per ogni individuo (per esempio la configurazione a pugno partendo dalla mano aperta si ottiene nel medesimo modo per tutte le persone).

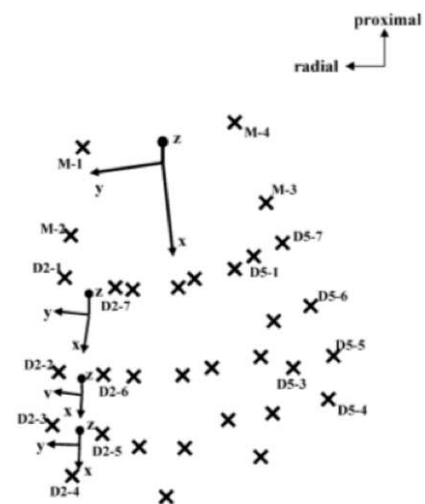
4.1.2 “Three-dimensional rotations of human three-joint fingers: an optoelectronic measurement. Preliminary Result” (Degeorges, Parasie, Mitton, Imbert, Goubier e Lavaste, 2005) [39]

Lo studio descritto in questo articolo si proponeva di quantificare con precisione le rotazioni tridimensionali delle falangi durante le flessioni delle dita lunghe della mano. Il set-up, *figura 4.2*,

prevedeva dei calchi termoplastici per ogni dito e per la mano sul quale erano stati applicati dei clusters costituiti da markers riflettenti di diametro pari a 17 mm. In totale sulla mano sono applicati 32 markers: su ogni dito vengono disposti 7 markers, 4 sulle falangi prossimali e 3 su quelle distali e 4 markers sulle ossa del metacarpo.



(a)



(b)

Figura 4.2 Posizionamento dei marker. [39]

Prima di effettuare l'acquisizione cinematica, sono definite quattro unità ossee: un'unità metacarpale e tre unità falangee ed è effettuata la trasformazione dal sistema di coordinate del cluster al sistema di coordinate anatomiche mediante una matrice di trasformazione. Successivamente sono selezionate due unità ossee adiacenti, una distale e l'altra prossimale, ed è effettuata l'analisi delle rotazioni della falange distale rispetto alla falange prossimale attorno all'asse y , z e x' , come mostrato in figura 4.3, a cui corrispondono rispettivamente i movimenti di flesso-estensione, di abduzione-adduzione e di rotazione assiale longitudinale.

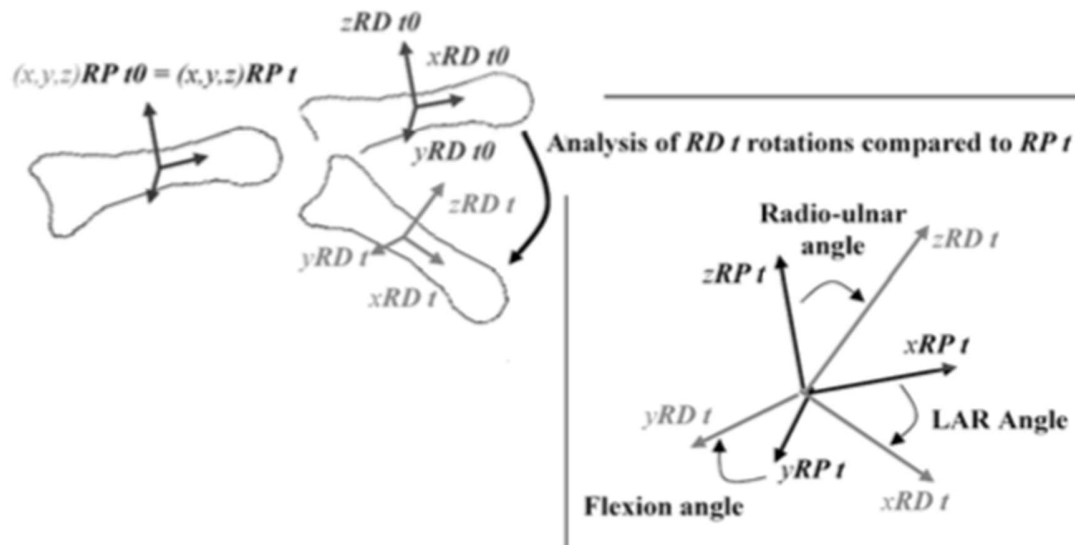


Figura 4.3 Analisi delle rotazioni falangee. Le rotazioni $[x, y, z]$ RD t relative del sistema di coordinate dell'unità ossea distale (RD) sono state calcolate con riferimento alla posizione $[x, y, z]$ RP t dell'unità ossea adiacente e prossimale (RP) [39]

Segue il processo di acquisizione cinematica, durante la quale i soggetti effettuano una flessione-estensione della mano destra a una velocità selezionata. I risultati dei movimenti registrati nelle articolazioni metacarpo-falangee e interfalangee prossimali e distali della mano sono riportati nella *tabella 9*.

Joint type and digitnumber		Maximal flexion/extension angles (deg) ^a Mean ± SD	Maximal radio-ulnar deviation angles (deg) ^a Mean ± SD	Automatic LAR in extreme flexion (deg) ^a Mean ± SD
MCP	2	90 ± 8 78 to 104	16 ± 7 6 to 30	-1 ± 3 -7 to 3
	3	93 ± 12 79 to 118	14 ± 10 4 to 33	-5 ± 4 -12 to 0
	4	96 ± 11 81 to 112	14 ± 8 5 to 32	-8 ± 3 -15 to -1
	5	97 ± 8 90 to 109	27 ± 13 8 to 39	-13 ± 8 -26 to -5
	2	91 ± 10 78 to 119	11 ± 10 5 to 30	1 ± 5 -11 to 6
PIP	3	88 ± 12 72 to 112	19 ± 10 4 to 39	6 ± 3 -1 to 10
	4	93 ± 10 77 to 111	16 ± 8 5 to 36	-9 ± 4 -16 to -4
	5	89 ± 8 78 to 103	17 ± 7 9 to 33	-8 ± 4 -14 to -2
	2	46 ± 8 29 to 61	10 ± 7 5 to 30	4 ± 4 -3 to 9
	3	42 ± 11 22 to 58	8 ± 3 5 to 13	5 ± 4 0 to 12
DIP	4	36 ± 12 10 to 57	6 ± 2 2 to 10	1 ± 8 -15 to 11
	5	34 ± 22 9 to 66	9 ± 6 4 to 22	5 ± 4 -2 to 9

^a: gli angoli massimi sono la differenza tra i valori estremi positivi e negativi durante ogni acquisizione di flessione / estensione

Tabella 9 Misurazione degli angoli di flessione estensione, radio-ulnari massimi e di rotazione assiale longitudinale nelle articolazioni MCP e PIP [39]

4.1.3 “Finger Kinematic Modeling and Real-Time Hand Motion Estimation”

(Cerveri, De Momi, Lopomo, Baud-Bovy, Barros e Ferrigno, 2007)

[40]

L’obiettivo dello studio condotto da Cerveri e dagli altri autori dell’articolo è quello di effettuare una valutazione cinematica del modello della mano e di stimarne real-time il moto.

Nel modello cinematico le otto ossa del carpo sono approssimate a un giunto sferico a tre gradi di libertà mentre le quattro ossa del metacarpo come un perno avente due gradi libertà, flessione-estensione e abduzione-adduzione. Le dita della mano presentano nel complesso tre gradi di libertà: l’articolazione metacarpo-falangea delle dita lunghe così come l’articolazione trapezio-metacarpale del pollice sono modellizzate come un perno a due gradi di libertà mentre le interfalangee distali e prossimali sono rappresentate come due cerniere che consentono un unico grado di libertà; complessivamente la mano presenta 24 gradi di libertà.

Al fine di condurre l’analisi cinematica sulla sono disposti 24 markers disposti come in *figura 4.4*, con la possibilità di aggiungere un altro marker sul pollice per considerarne la pronazione statica.

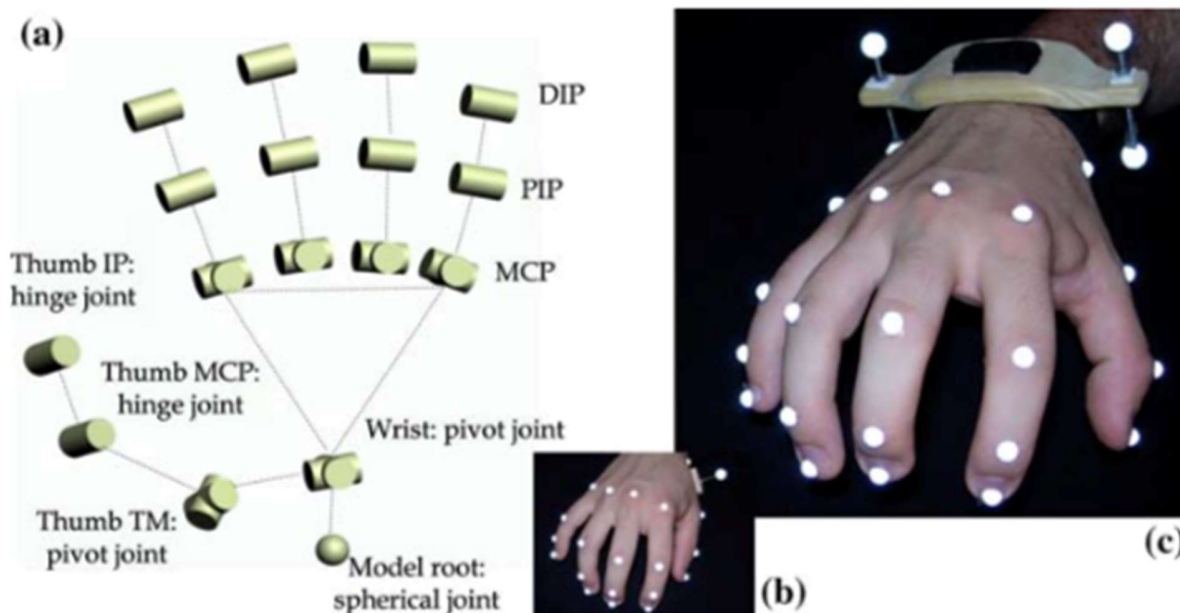


Figura 4.4 Modello cinematico della mano e protocollo di posizionamento dei 24 markers. Quattro marker, collegati rigidamente su una struttura bloccata sul polso, tengono conto della traslazione e dell'orientamento globale della mano; ogni dito è dotato di quattro marker posti in corrispondenza delle articolazioni. I quattro marker in corrispondenza delle articolazioni MCP consentono la ricostruzione del movimento del palmo [40].

Durante ogni sessione di acquisizione cinematica ai soggetti è stato richiesto di effettuare 4 tipologie di movimento:

1. flesso-estensione volontaria del pollice;
2. abduzione-adduzione del pollice;
3. tip to tip che coinvolge sia la flesso-estensione che la abduzione-adduzione;
4. presa di un cilindro.

Dopo l'acquisizione cinematica seguono gli steps di assegnazione dei nomi ai markers (markers labeling) e la calibrazione statica, che permettono l'adattamento dei parametri del modello alla mano del soggetto e la calibrazione dinamica che consente il recupero di posizione perse durante il movimento della mano in seguito alla occlusione dei markers.

Successivamente viene effettuata la stima real-time del moto della mano: assumendo che nel sistema di riferimento locale le coordinate dei marker non varino durante il moto, allora il moto associato a un grado di libertà viene calcolato nel seguente modo:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix}$$

dove $(x_p \ y_p \ z_p)$ e $(x_l \ y_l \ z_l)$ sono le coordinate dei marker ricostruiti, espressi nel sistema di riferimento prossimale e locale, e l'angolo α rappresenta l'angolo di flesso-estensione. Se il segmento anatomico presenta due gradi di libertà, allora il moto sarà ottenuto risolvendo prima la flesso-estensione e poi la abduzione-adduzione:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta\cos\alpha & \sin\beta\sin\alpha \\ \sin\beta & \cos\beta\cos\alpha & -\cos\beta\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix}$$

dove $(x_p \ y_p \ z_p)$ e $(x_l \ y_l \ z_l)$ sono le coordinate dei marker ricostruiti, espressi nel sistema di riferimento prossimale e locale, e l'angolo α rappresenta l'angolo di flesso-estensione e β quello di abduzione - adduzione. In entrambi i casi per evitare che la mano effettui dei movimenti non realistici

sono imposti dei vincoli. In *figura 4.5* sono riportati gli andamenti della flessione-estensione durante il movimento tip to tip; si osserva che tutte le traiettorie angolari rientrano nel RoM riportato in letteratura.

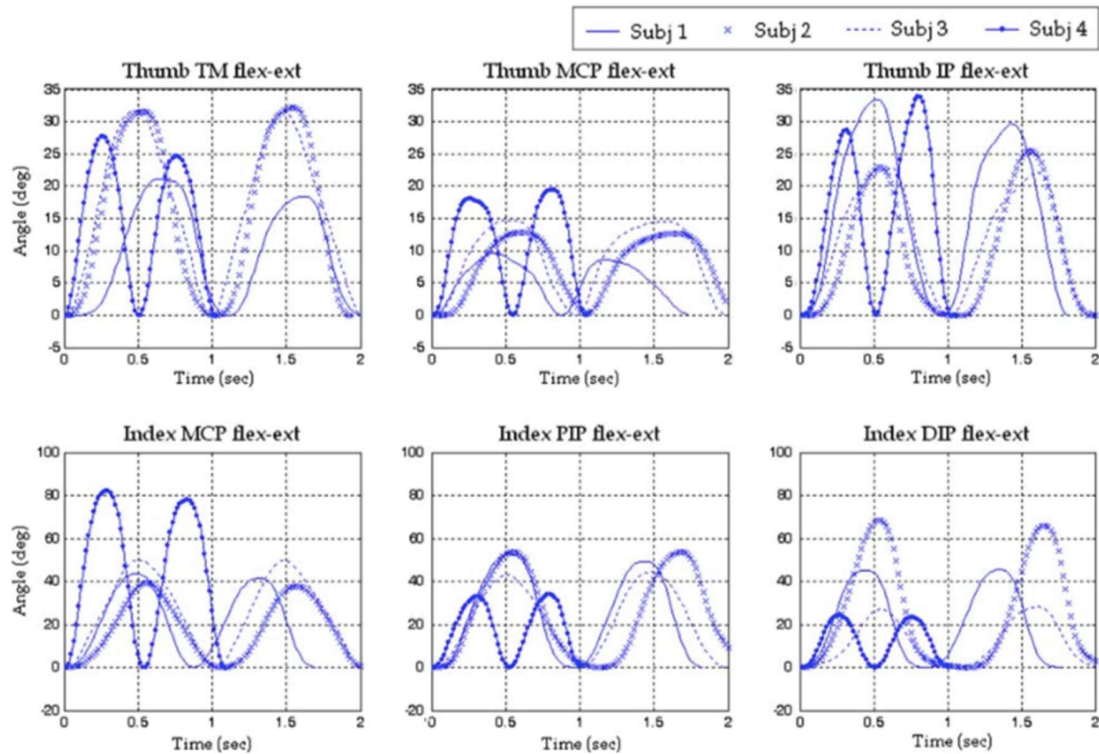


Figura 4.5 Andamento della flessione-estensione durante il movimento tip to tip

4.1.4 “Multi-finger coordination in healthy subjects and stroke patients: a mathematical modelling approach” (Carpinella, Jonsdottir e Ferrarin, 2011) [41]

Lo studio condotto da Carpinella, Jonsdottir e Ferrarin fornisce una caratterizzazione completa degli aspetti spaziali e temporali dei movimenti della mano, espressi in termini di RoM e di coordinazione dei movimenti, sia in soggetti sani che in pazienti che presentano emiparesi in seguito ad ictus. Come primo step, sono posizionati 17 markers retroriflettenti di diametro pari a 6 mm sulle falangi prossimali e distali, sulla testa metacarpale delle dita e sul processo stiloideo di ulna e radio. È stato definito un sistema di riferimento locale che prevede l’origine in corrispondenza della testa metacarpale dell’indice, l’asse x sulla retta che congiunge la testa metacarpale dell’indice con quella del

mignolo, l'asse y è identificato dalla congiungente processo stiloideo del radio e testa metacarpale dell'indice e infine l'asse z è perpendicolare al piano metacarpale definito dai vettori M2-M5 e SR-M2. (figura 4.6)

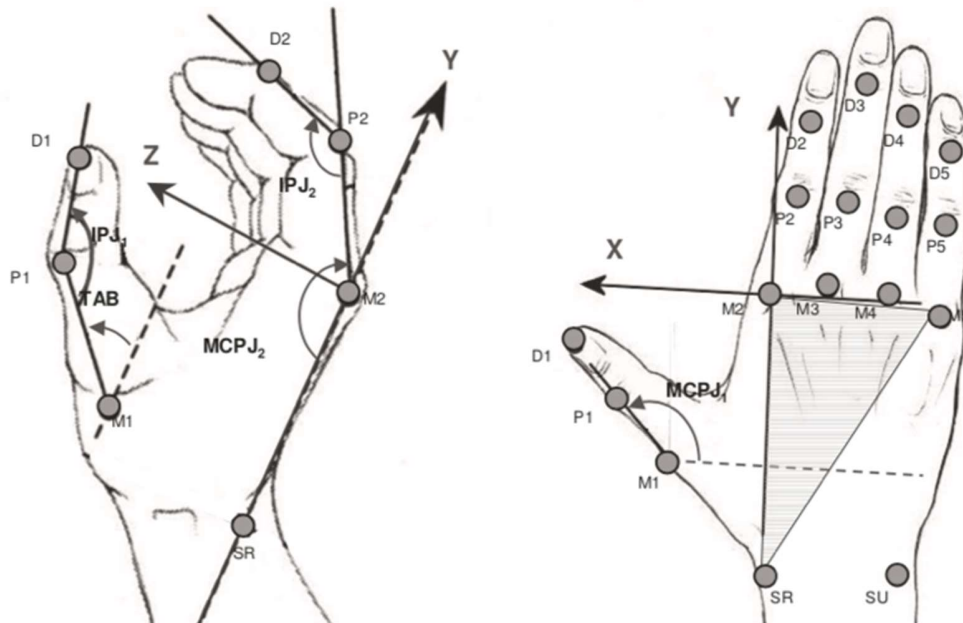


Figura 4.6 Definizione del sistema di riferimento locale della mano [41]

Successivamente è stata condotta l'analisi cinematica e quella della coordinazione interarticolare e tra le dita durante l'apertura e la chiusura della mano. I valori dell'analisi cinematica condotta sono riportati in *tabella 10*.

Nei *soggetti sani* si è osservato che il RoM, in termini di flesso - estensione, era nel range fisiologico e in entrambe le mani vi era coordinazione interarticolare durante l'apertura e la chiusura dei giunti MCP e IP delle dita. Inoltre l'analisi del ritardo IPJ-MCPJ non ha rivelato alcuna differenza significativa tra le dita lunghe nell'apertura della mano o nella chiusura indicando un alto livello di coordinazione tra le dita.

Nei *pazienti con emiparesi in seguito ad ictus*, i risultati ottenuti dopo aver condotto l'analisi cinematica, hanno mostrato una riduzione degli angoli di flesso- estensione (figura 4.7), a causa di un elevato deficit nell'estensione della mano dovuti a meccanismi di controllo neurofisiologici alterati. La durata di apertura e chiusura della mano è maggiore rispetto ai soggetti sani passando da una durata di 0.9 s a una durata di 3,9 s per l'apertura della mano e 5,1 s per la chiusura. In particolare, si è osservato che l'elevata durata per la chiusura della mano era collegata alla debolezza dei muscoli flessori.

	CONTROL				STROKE			
	Thumb		Long Fingers		Thumb		Long Fingers	
	MCPJ	IPJ	MCPJ	IPJ	MCPJ	IPJ	MCPJ	IPJ
ROM [deg]	61.1 (23.8)	64.0 (24.4)	90.3 (12.7)	109.1 (12.5)	25.8*** (18.4)	40.5** (20.0)	50.4*** (20.4)	64.5*** (27.7)
			§§§		§§		§	
Max. ext. angle [deg]	143.0 (14.6)	188.8 (16.8)	186.7 (8.1)	189.5 (8.7)	116.6*** (22.6)	180.4 (18.2)	166.7*** (17.0)	159.5*** (26.8)
	§§§				§§§			
Max. Flex. Angle [deg]	81.7 (16.4)	125.2 (20.5)	96.6 (11.2)	80.4 (7.7)	90.7 (17.5)	139.6* (18.8)	116.3*** (13.1)	95.0*** (12.8)
	§§§		§§§		§§§		§§	

Tabella 10 Variazione del RoM nei soggetti sani e in quelli con emiparesi [41]

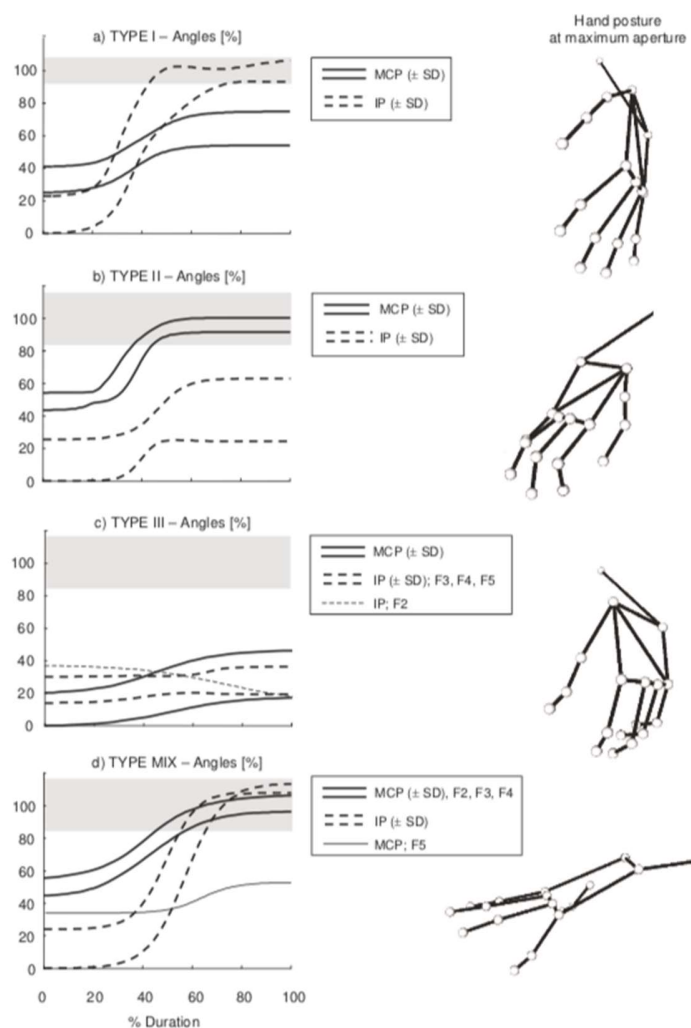


Figura 4.7 Angoli articolari e posizioni delle mani alla massima apertura di quattro soggetti con ictus [41]

4.1.5 “Collection and Analysis of Human Upper Limbs Motion Features for Collaborative Robotic Applications” (Digo, Antonelli, Cornagliotto, Pastorelli e Gastaldi, 2020) [42]

In relazione al lavoro di tesi effettuato, il seguente articolo è stato analizzato per capire come creare gli assi di riferimento locale per ogni distretto anatomico.

La strumentazione usata durante questo studio prevedeva 7 l'uso di sensori inerziali (IMUs), di cui uno posizionato sul bordo del tavolo in modo da riferire gli altri sei IMUs al sistema di riferimento di questo sensore e i rimanenti sei IMUs posti sulla parte superiore del corpo dei partecipanti, e di 17 markers riflettenti di diametro pari a 17 mm. Tre di questi markers (A, B, C) sono fissati al tavolo per definire il sistema di riferimento globale: l'asse x è ottenuto considerando i markers A e B, l'asse di supporto s viene dedotto considerando i markers C e B, l'asse z si ricava mediante il prodotto vettoriale tra l'asse x e l'asse di supporto e come conseguenza l'asse y si stima dalla regola della mano destra noti l'asse x e z. I restanti quattordici markers sono posizionati in corrispondenza:

- del processo stiloideo destro e sinistro (WMR, WLR, WML, WLL);
- dei condili laterali e mediali del gomito destro e sinistro (EMR, ELR, EML, ELL);
- dell'acromion (ACR, ACL);
- della tacca sosprasternale (IJ);
- del processo spinale dell'ottava vertebra toracica (T8);
- dell'IMUs posti in corrispondenza dell'avambraccio (RFA_IMU) e del braccio (RUA_IMU) destro.

Il posizionamento dei markers e dei sensori inerziali sul soggetto e sul tavolo sono rappresentati in *figura 4.8*.

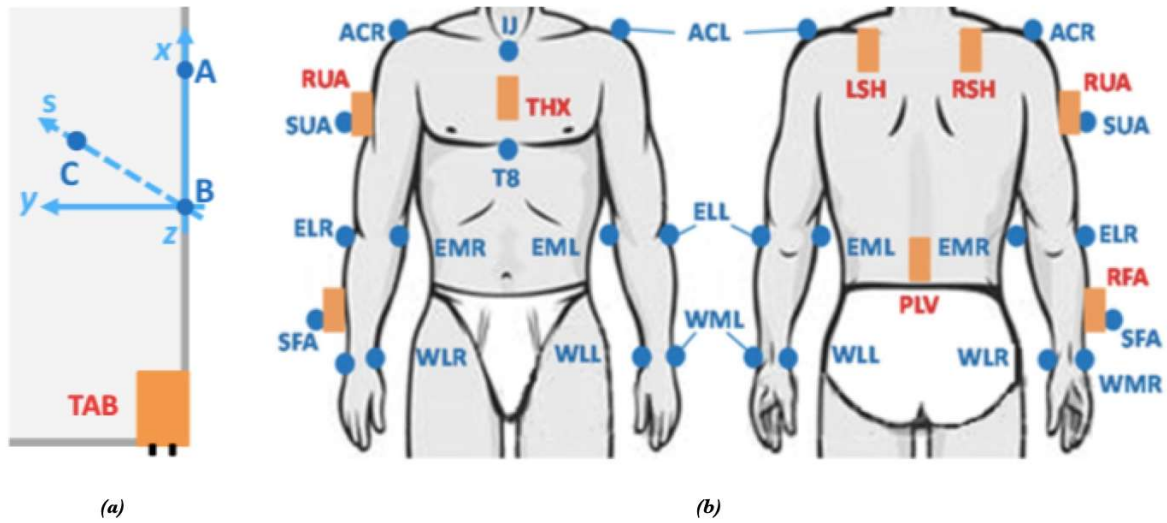


Figura 4.8 (a) IMU posizionato sul bordo del tavolo e definizione del sdr globale; (b) posizionamento dei markers e degli IMUs sul soggetto [42]

Una volta definito il sistema di riferimento globale e il posizionamento dei markers e dei sensori inerziali, si procede con la modellizzazione della parte superiore del corpo dei soggetti e la definizione del sistema di riferimento anatomico locale.

La parte superiore del corpo è modellizzata attraverso cinque segmenti rigidi, avambraccio destro e sinistro, braccio destro e sinistro e tronco, collegati tra loro mediante le articolazioni. Successivamente, note le posizioni dei marker, è stato costruito un sistema di riferimento anatomico locale (figura 4.9) per ciascuno dei tre segmenti coinvolti nel movimento: avambraccio, braccio e tronco.

I sistemi di riferimento dell'avambraccio e del braccio, (x_{fa}, y_{fa}, z_{fa}) e (x_{ua}, y_{ua}, z_{ua}) , sono stati costruiti nel medesimo modo:

- gli assi x (x_{fa}, x_{ua}) sono longitudinali ai segmenti rigidi che modellizzano l'avambraccio e il braccio;
- gli assi z (z_{fa}, z_{ua}) sono perpendicolari ai piani definiti dagli assi x e dagli assi di supporto s (s_{fa}, s_{ua}) ;
- gli assi y (y_{fa}, y_{ua}) sono stati ottenuti mediante la regola della mano destra, una volta nota l'orientazione degli altri due assi.

Il sistema dell'avambraccio è centrato nel punto medio tra i due markers posti sul polso mentre l'origine del sistema di riferimento locale del braccio è in corrispondenza del punto medio tra i due markers posti sull'epicondilo laterale e mediale del gomito.

Inoltre, l'asse x del sistema del braccio destro (x_{ua}) è stato definito attraverso l'identificazione del centro di spalla, che, a sua volta, è stato ottenuto sottraendo in direzione verticale dal marker posizionato sull'acromion destro (ACR) il 17% della distanza degli acromion.

Infine il sistema di riferimento anatomico del tronco ha origine nel punto medio tra i due markers posizionati sugli acromion destro e sinistro ed è composto da un asse x verticale (x_{tr}), da un asse y orizzontale (y_{tr}) e da un asse z (z_{tr}) ottenuto dal prodotto vettoriale dei due precedenti.

Oltre al sistema di riferimento locale, è stato costruito anche il sistema di riferimento tecnico (figura 4.9) usato quando è necessario ricostruire la traiettoria di marker occlusi. I sistemi di riferimento tecnici del braccio e dell'avambraccio sono stati definiti mediante la definizione gli assi di supporto: l'asse supporto dell'avambraccio (s_{tfa}) è identificato come il vettore che congiunge il marker posizionato sul processo stiloideo laterale del polso con quello posto sopra il sensore IMU dell'avambraccio; l'asse supporto del braccio (s_{tua}) è identificato come il vettore che congiunge il marker posizionato sull'epicondilo laterale del gomito con quello posto sopra il sensore IMU del braccio. Dal prodotto dell'asse di supporto dell'avambraccio e del braccio con l'asse x (x_{tfa} : vettore che congiunge il marker posizionato sul processo stiloideo laterale del polso con quello sull'epicondilo laterale del gomito e x_{tua} : vettore che congiunge il marker posizionato sull'epicondilo laterale del gomito con quello sull'acromion della spalla destra) si ottiene l'asse z (z_{tfa}, z_{tua}); di conseguenza l'asse y (y_{tfa}, y_{tua}) si otterrà mediante la regola della mano destra note le direzioni degli altri due assi.

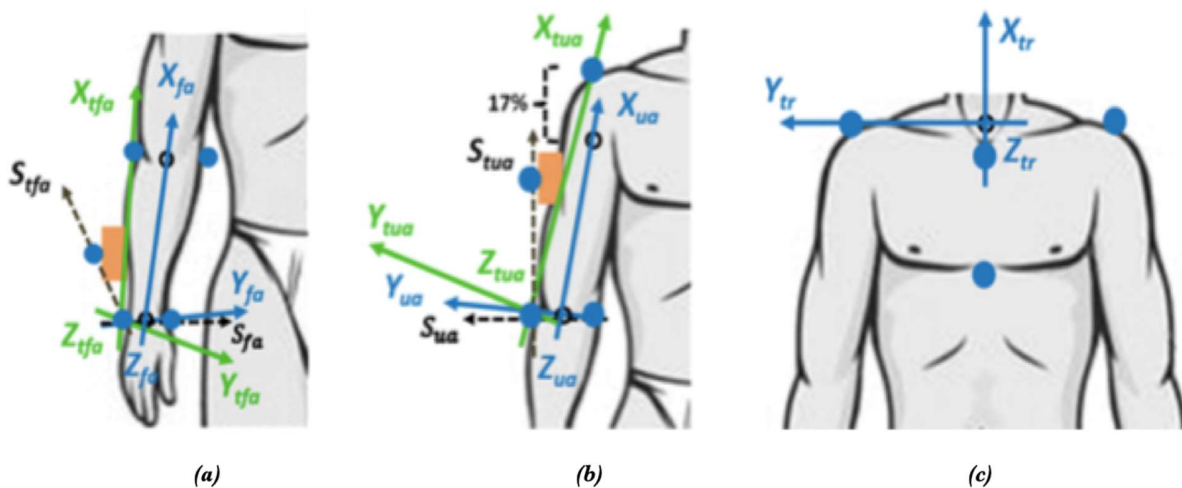


Figura 4.9 Definizione degli assi di riferimento anatomici locali e tecnici dei tre segmenti coinvolti nel movimento:

(a) avambraccio, (b) braccio e (c) tronco [42]

Di seguito viene riportata una tabella che riassume gli articoli principali dell'analisi in letteratura condotta.

<i>TITOLO</i>	<i>AUTORI</i>	<i>OBIETTIVO</i>
<i>“Model-based analysis of hand posture”</i>	<i>Lee and Kunii, 1995</i>	<i>Definizione di un modello cinematico della mano</i> GDL: 27 per il sistema completo 21 se non si considerano i gdl del polso DIP e PIP delle dita → 1 gdl (F/E) MCP delle dita → 2 gdl (F/E, AB/AD) IP e MCP del pollice → 1 gdl (F/E) TM del pollice → 2 gdl (F/E, AB/AD) POLSO → 3 gdl (F/E, AB/AD, TORSIONE) VINCOLI IMPOSTI: da 21 gdl a 19 $0^{\circ} \leq \theta_{MCP_{FLESS}} \leq 90^{\circ}$ $0^{\circ} \leq \theta_{PI_{FLESS}} \leq 110^{\circ}$ $0^{\circ} \leq \theta_{DI_{FLESS}} \leq 90^{\circ}$ $-15^{\circ} \leq \theta_{AB/AD} \leq 15^{\circ}$ $\theta_{MCP_{AB/AD}(III)} = 0^{\circ}$ $\theta_{TM_{AB/AD}} = 0^{\circ}$ $\theta_{DIP} = \frac{2}{3} \theta_{PIP}$

<i>“Three-dimensional rotations of human three-joint fingers: an optoelectronic measurement”</i>	<i>Degeorges, Parasie, Mitton, Imbert, Goubier e Lavaste, 2005</i>	<i>Quantificazione precisa delle rotazioni tridimensionali delle falangi durante le flessioni delle dita lunghe della mano.</i> 32 markers: acquisizione cinematica con valutazione degli angoli di F/E, AB/AD e PRONO-SUPINAZIONE per le articolazioni PIP, DIP e MCP.
<i>“Finger Kinematic Modeling and Real-Time Hand Motion Estimation”</i>	<i>Cerveri, De Momi, Lopomo, Baud-Bovy, Barros e Ferrigno, 2007</i>	<i>Valutazione cinematica del modello della mano e di stimarne real-time il moto</i> GDL: 24 complessivi CARPO → 3 gdl METACARPO → 2 gdl (F/E, AB/AD) MCP delle dita → 2 gdl DIP e PIP delle dita → 1 gdl TM e MCP del pollice → 2 gdl IP → 1 gdl 24 markers per effettuare analisi cinematica

<i>“Multi-finger coordination in healthy subjects and stroke patients: a mathematical modelling approach”</i>	<i>Ilaria Carpinella, Johan Jonsdottir e Maurizio Ferrarin, 2011</i>	<i>Caratterizzazione completa degli aspetti spaziali e temporali dei movimenti della mano sia in soggetti sani che in pazienti che presentano emiparesi in seguito ad ictus.</i> 17 markers con definizione del sistema di riferimento locale Analisi cinematica e analisi della coordinazione inter articolare e tra le dita: ➤ soggetti sani: RoM (F/E) nel range fisiologico. In entrambe le mani vi era coordinazione interarticolare durante l'apertura e la chiusura dei giunti MCP e IP delle dita. Alto livello di coordinazione tra le dita. ➤ pazienti con emiparesi in seguito ad ictus: riduzione degli angoli di flesso estensione (meccanismi di controllo neurofisiologici alterati). Elevata durata (5,9s) nella chiusura della mano → debolezza dei muscoli flessori.
---	--	---

<i>“Collection and Analysis of Human Upper Limbs Motion Features for Collaborative Robotic Applications”</i>	<i>Digo, Antonelli, Cornagliotto, Stefano Pastorelli e Gastaldi, 2020</i>	<i>Definizione degli assi di riferimento anatomici locali.</i> <i>7 sensori inerziali</i> (1 sul bordo del tavolo e gli altri 6 posti sul soggetto) + <i>17 markers</i> (3 di questi markers sono fissati al tavolo→ sdr globale; i restanti 14 markers sono posizionati sul soggetto) SDR braccio-avambraccio • gli assi x sono longitudinali ai segmenti rigidi • gli assi z sono perpendicolari ai piani definiti dagli assi x e dagli assi di supporto s • gli assi y sono stati ottenuti mediante la regola della mano destra SDR tronco ed è composto da un asse x verticale, da un asse y orizzontale e da un asse z ottenuto dal prodotto vettoriale dei due precedenti. È stato costruito anche il SDR TECNICO usato quando è necessario ricostruire la traiettoria dei markers occlusi.
--	---	--

Tabella 11 Riassunto dell'analisi condotta in letteratura

5 Sistemi Optoelettronici

Il sistema motion capture (MoCap) ottico registra il movimento del corpo umano, mediante l'uso di diverse telecamere a luce infrarossa che catturano la luce riflessa dai markers posizionati sui punti di repere anatomici. I movimenti registrati dalle telecamere sono trasmessi al computer, il software elabora le immagini 2D ottenute dalle telecamere e ricostruisce la traiettoria 3D dei marker. Il MoCap può essere applicato in vari ambiti:

- a) *Clinico e Riabilitativo*: le soluzioni ottiche MoCap di Vicon sono ampiamente usate nell'analisi clinica del cammino, nella riabilitazione degli amputati, nello studio del movimento degli arti, nell'ambito del controllo motorio e delle neuroscienze.
- b) *Sportivo* mediante il software è effettuata un'analisi biomeccanica della performance dell'atleta con l'obiettivo di ottenere dei miglioramenti attraverso allenamenti personalizzati e contemporaneamente ridurre i rischi associati alle prestazioni sportive;
- c) *Studio del movimento animale*: è possibile studiare attraverso il software la biomeccanica e analizzare i movimenti dell'animale;
- d) *Cinematografico* per creare animazioni partendo da personaggi realistici per film o videogiochi.

La figura 5.1 mostra i possibili campi di applicazione del sistema motion capture.

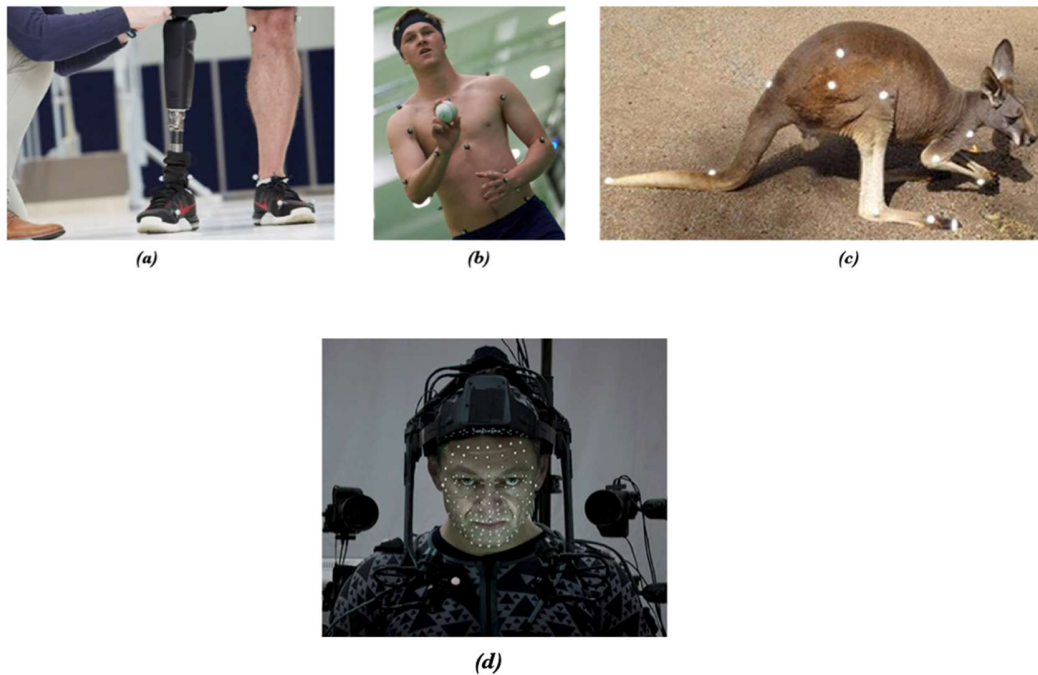


Figura 5.1 Ambiti di applicazione del Vicon Nexus: (a) clinico, (b) sportivo, (c) animale e (d) cinematografico [43]

I sistemi di motion capture ottici possono essere di due diverse tipologie: marker-less oppure marker-based (*figura 5.2*). La differenza tra le due tecnologie di MoCap dipende dal fatto che la prima consente la ricostruzione del movimento umano mediante algoritmi di image processing partendo da una serie di movimenti registrati dalle telecamere, mentre la seconda prevede il posizionamento di markers su appositi punti di repere.

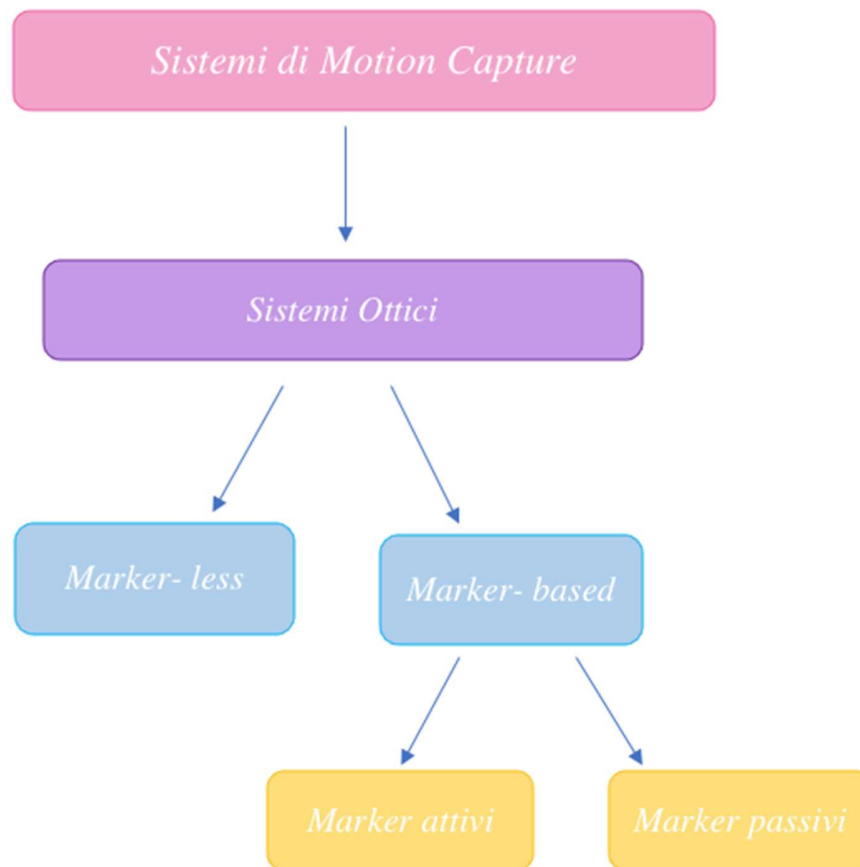


Figura 5.2 Tipologie di MoCap Ottica

I sistemi optoelettronici marker-based, come quelli usati in questo studio, usano telecamere a video e ad infrarossi unitamente a markers posti sulla cute del soggetto al fine di stimare le traiettorie cinematiche dei punti immagine registrati dalle telecamere. Questa tipologia di sistemi optoelettronici basa il suo funzionamento sul principio della stereofotogrammetria che consente di ricostruire la posizione di un punto che si muove nello spazio, fornendo una terna spaziale caratteristica (x,y,z) rispetto alla terna di riferimento del laboratorio stesso [44]. Per poter definire la posizione spaziale di un punto per mezzo delle sue coordinate, è necessario che il punto venga osservato contemporaneamente da almeno due punti di vista distinti, come mostrato in *figura 5.3*.

La registrazione e l'elaborazione delle posizioni permette di ricavare anche le velocità e le accelerazioni dei punti lungo la traiettoria.

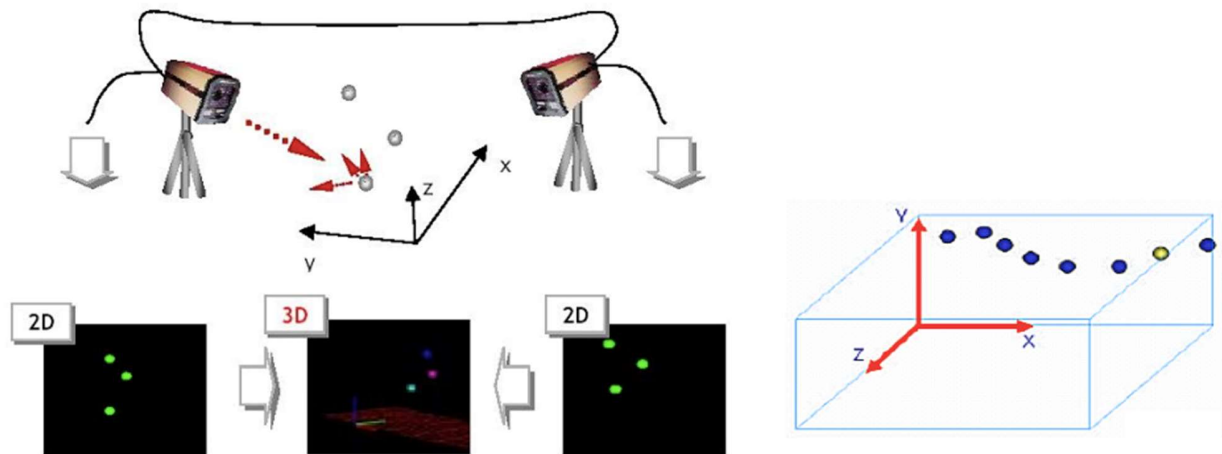


Figura 5.3 principio di funzionamento della stereofotogrammetria applicato ai sistemi ottici [45]

5.1 Hardware

In questo capitolo verranno descritte le prestazioni delle telecamere a infrarosso usate nei sistemi optoelettronici e le tipologie di markers usati per poter effettuare analisi del movimento.

Le telecamere a infrarosso IR registrano il movimento dei marker passivi posizionati sul soggetto trasferendo le informazioni sul software dedicato; i diversi fotogrammi vengono acquisiti attraverso una luca stroboscopica a diodi (LEDs) sincronizzata con la velocità di acquisizione dell'immagine. Esse sono portatili, compatte e possono essere montate ovunque in quanto leggere e di ridotte dimensioni; consentono la variazione della lunghezza focale: è infatti possibile effettuare un ingrandimento per variare le dimensioni del campo visivo. La risoluzione spaziale è elevata (oltre 1Mpx) e in grado di consentire un'acquisizione precisa anche usando markers di piccolo diametro in un grande volume di cattura. La frequenza di acquisizione può superare i 300 Hz in alcuni modelli, rendendo possibile la registrazione di oggetti che si muovono a velocità elevate. Esse necessitano di un unico cavo ethernet sia per l'alimentazione che per la trasmissione dei dati.

Le videocamere ad alta risoluzione HD sono integrate e sincronizzate con l'acquisizione 3D possibile grazie all'utilizzo del Vicon Active Wand, un oggetto che viene impiegato per la calibrazione dinamica

contemporanea delle telecamere IR e video. In questo modo è possibile integrare il modello 3D con l'immagine visiva per poter apprezzare al meglio i dettagli del movimento. La presenza delle telecamere ad alta risoluzione è molto utile durante l'analisi di soggetti tetraplegici, i quali necessitano di una carrozzina che potrebbe causare problemi di occlusione durante l'acquisizione dei task di movimento. La presenza delle telecamere HD consente un riscontro video che potrebbe aiutare la comprensione dei dati durante la fase di analisi. (figura 5.3)



Figura 5.4 Tipologie di telecamere a IR e HD Vicor [43]

Per effettuare uno studio di analisi del movimento solitamente le telecamere a IR sono disposte lungo il perimetro del laboratorio. Dal momento che la tesi ha l'obiettivo di analizzare i movimenti dell'arto superiore e della mano, per effettuare le prove sperimentali è stato necessario modificare l'assetto delle telecamere restringendo il volume di cattura così da rendere visibili i RoM della mano. Dalla analisi in letteratura condotta [40] [41] [46] [47], al fine di capire come restringere lo spazio di cattura (working space), si è dedotto che per riuscire a visualizzare al meglio i movimenti della mano è necessario considerare un volume di cattura piuttosto ristretto di circa $60\text{-}70\text{ cm}^3$ e avere un numero di telecamere variabile da sei a nove in base ai movimenti che si desiderano monitorare. Nell'articolo [48] viene descritta una possibile disposizione delle telecamere: le sei telecamere a IR sono disposte non parallelamente tra di loro così da evitare che i marker venissero sovrapposti o nascosti e per consentire una corretta ricostruzione 3D. La disposizione delle telecamere è riportato in figura 5.5: cinque telecamere ($C_1 - C_5$) disposte attorno al volume di cattura ($60 \times 60 \times 60\text{ cm}^3$) e la sesta (C_6) è disposta in modo da essere sopraelevata rispetto alle precedenti.

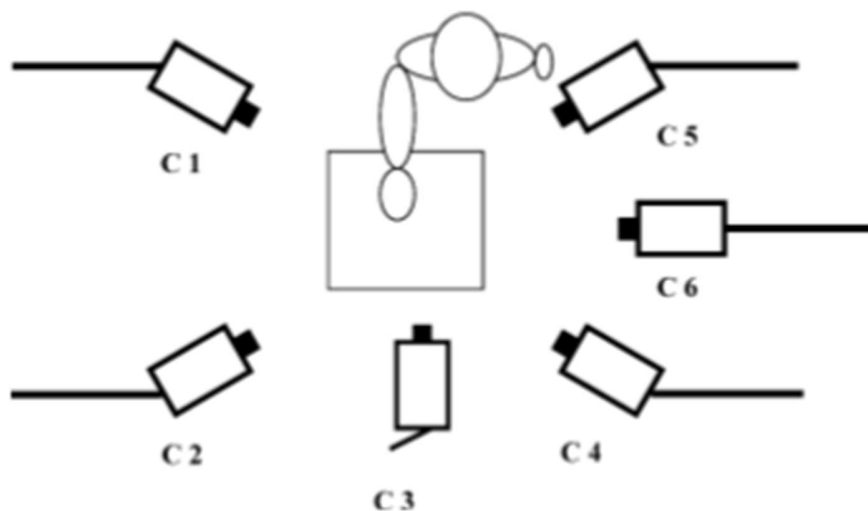


Figura 5.5 Disposizione telecamere IR come descritto nell'articolo [48]

Per valutare il RoM delle articolazioni dell'arto superiore e della mano e per quantificare un eventuale recupero dei muscoli nei soggetti che sono stati sottoposti all'operazione di Nerve Transfer, si è deciso di modificare la disposizione delle otto telecamere a infrarosso presenti nel laboratorio del passo dell'Unità Spinale Unipolare di Torino (U.S.U) come segue:

- sei delle otto telecamere rimangono attaccate alle pareti del laboratorio;
- le restanti due sono posizionate su dei treppiedi regolabili per telecamere e disposti lateralmente al tavolo su cui sono effettuati i movimenti della mano, come mostrato in *figura 5.6*.

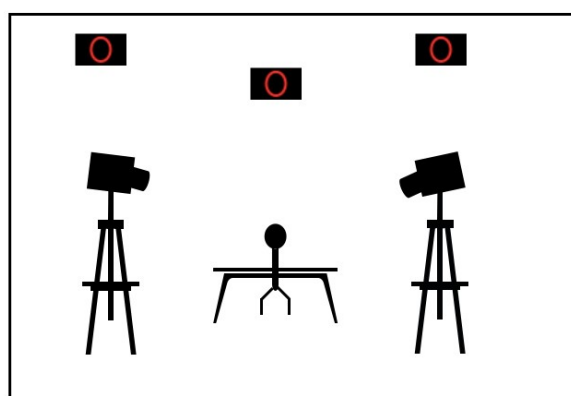


Figura 5.6 Set up sperimentale: posizionamento telecamere a IR attaccate alle pareti e sui treppiedi

Dopo aver posizionato nel modo desiderato le telecamere si procede con la fase di calibrazione mediante active wand, dispositivo formato da cinque LED distribuiti, come indicato in *figura 5.7*, e con la fase di mascheramento, che permette l'eliminazione dei riflessi indesiderati che interferiscono con la fase di acquisizione.



Figura 5.7 Active wand [43]

La calibrazione consente al software di riconoscere l'esatta posizione reciproca delle camere, di linearizzare la distorsione ottica dovuta alla deformazione della lente mediante la movimentazione dell'active wand all'interno del volume di cattura e infine di definire un sistema di riferimento del

Una volta effettuata la calibrazione delle telecamere la schermata del software Nexus compare come mostrato in *figura 5.8*

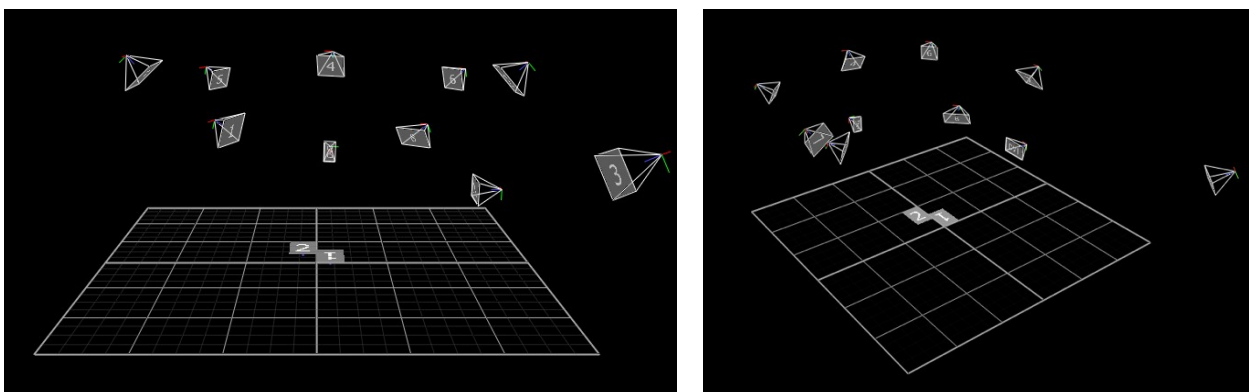


Figura 5.8 Visualizzazione delle telecamere nel software Nexus [43]

Ogni volta che le telecamere a infrarosso sono spostate dal loro posizionamento di origine è necessario regolare il focus, come mostrato in *figura 5.9*, affinché i markers siano ben visibili nello spazio di cattura.

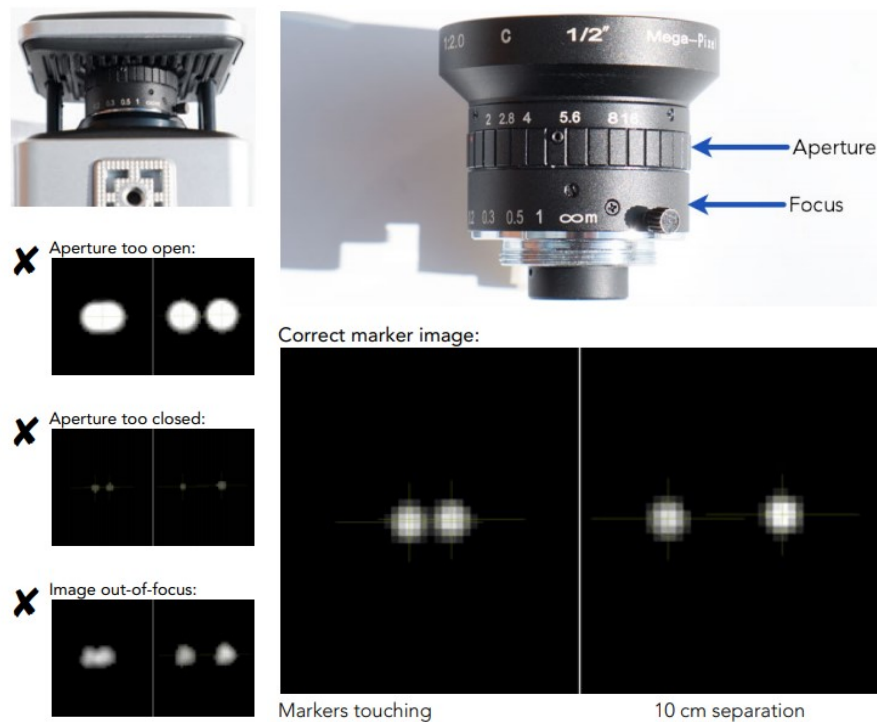


Figura 5.9 Regolazione del focus della telecamera IR [43]

Come precedentemente detto oltre alle telecamere durante l'analisi del movimento sono di fondamentale importanza i markers si distinguono in:

- **marker attivi**, *figura 5.10*, sono costituiti da LEDs che emettono segnali luminosi e vengono posizionati in specifici punti di repere dei quali si vuole definire la traiettoria. Questi dispositivi necessitano però di alimentazione e sincronizzazione via cavo ed è necessario che almeno due telecamere riprendano contemporaneamente ogni marker per registrarne la posizione.



Figura 5.10 Marker attivo con relativa unità di connessione [49]

- **marker passivi** (figura 5.11), di forma sferica o semi-sferica, sono costituiti da materiale catarifrangente in grado di riflettere la luce infrarossa delle telecamere.

I markers passivi devono essere posizionati, mediante nastro biadesivo, in modo che siano visibili al maggior numero di telecamere minimizzando l'errore di misura. Esistono delle regole comuni a tutti i protocolli di posizionamento dei markers: i markers sono posizionati in punti di repere anatomici poco soggetti ad artefatti di cute e per individuare l'asse di rotazione i due markers si posizionano in corrispondenza del lato mediale e laterale dell'articolazione.

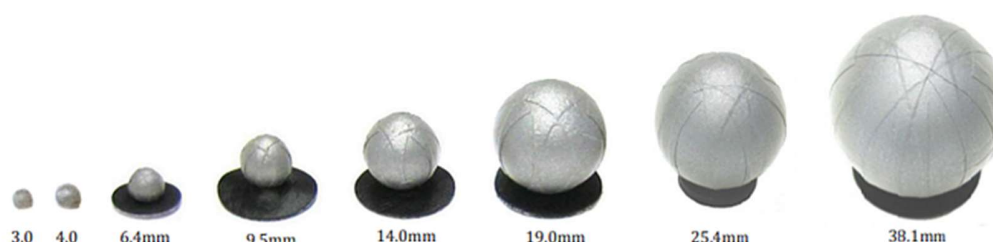


Figura 5.11 Markers passivi di varie dimensioni [50]

Durante questo lavoro di tesi è stata effettuata solo la MoCap ottica marker-based con markers passivi.

5.2 I software

Il sistema acquisizione Vicon [43] è composto da una serie di telecamere a video e infrarosse, software specifici per diversi tasks (*Vicon Nexus* per la registrazione e il processamento dei dati, *Vicon Procalc* per la modellizzazione e il calcolo degli output e *Vicon Polygon* per la stesura dei referti), una serie di modelli selezionabili dall'utente al fine di creare uno stick diagram partendo dalle posizioni dei vari marker e infine dispositivi hardware, quali pedane dinanometriche e connettori wireless dei sensori EMG, che integrano il sistema di partenza (figura 5.12).

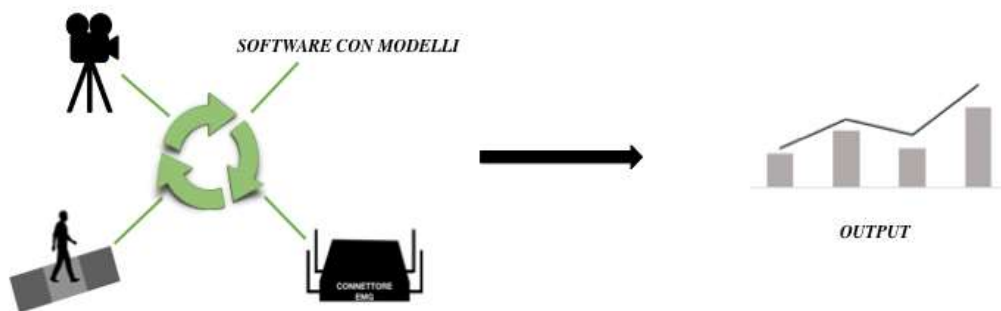


Figura 5.12 Funzionamento del sistema Vicon

Durante il seguente studio sono stati usati i software Vicon Nexus e Vicon Procalc; il primo consente la preparazione del setup, la calibrazione del sistema e di effettuare la successiva esecuzione della sessione di motion-capture mentre il secondo consente l'elaborazione dei dati ottenuti dal precedente software generando gli output desiderati che possono poi essere visualizzati e ulteriormente processati in Nexus.

I passi da seguire in Nexus sono:

1. preparazione e calibrazione del sistema;
2. creazione del soggetto;
3. acquisizione della prova statica e modellizzazione statica del soggetto,
4. acquisizione e processamento della prova dinamica (ricostruzione e labeling).

Passando al software Procalc, gli steps da seguire sono i seguenti:

5. apertura della prova precedentemente acquisita e processata con Nexus (file formato .c3d)
6. creazione di uno schema con le variabili di interesse, anch'esso salvato in formato .c3d;
7. contrassegnare la prova che si vuole processare e selezionare lo schema da usare;

8. esportare i file elaborati in Procalc per processarli in Nexus.

5.2.1 *Vicon Nexus*

Il software Vicon Nexus è una piattaforma completa, con un'interfaccia user friendly e perfettamente integrabile con tutto l'hardware Vicon in grado di acquisire e analizzare qualsiasi tipo di movimento sia umano che animale.

L'interfaccia del software Vicon Nexus è composta da quattro differenti sezioni: a sinistra vi è la sezione System che permette di verificare che tutti gli hardware siano connessi correttamente al software e la sezione Subject che permette di definire il markers set da usare partendo da un template preesistente o generandone uno nuovo; nella parte centrale in alto vi è il viewer, all'interno del quale è possibile visualizzare il modello precedentemente creato, i grafici degli outputs o le riprese a video delle telecamere, mentre in basso vi è la sezione Communications che permette in modalità Live la creazione del database, del soggetto e della sessione mentre in modalità Offline la selezione del trial desiderato; infine a destra vi è la sezione che consente di effettuare diverse operazioni sul sistema o sul modello creato come per esempio la calibrazione o l'assegnazione del nome ai markers.

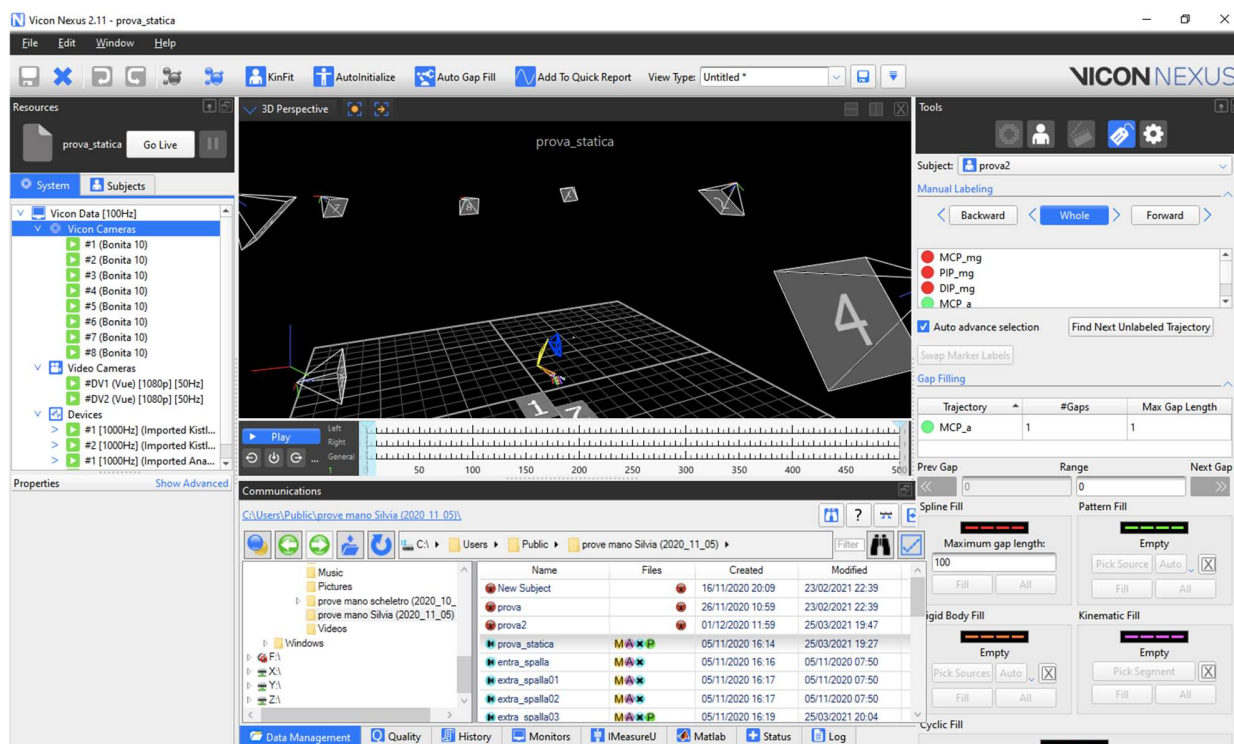


Figura 5.13 *Interfaccia Vicon Nexus*

Una volta avviato il software Vicon Nexus, i passi da seguire sono i seguenti:

- in modalità *Live* si effettua la preparazione e la calibrazione del sistema. Terminate queste fasi preliminari, si procede nella sezione Data Management alla creazione di un nuovo Database all'interno della quale vengono memorizzati i dati. Successivamente nel Database viene creata la sezione "Patient Classification", che permette di raggruppare tutti i soggetti affetti dalla medesima patologia e all'interno di questa classificazione viene definito il nome del soggetto analizzato; infine si crea la sezione "session" in cui sono registrate tutte le prove effettuate dal soggetto. Prima di procedere all'acquisizione delle prove statica e dinamiche, si posizionano i markers sui punti di repere anatomici come descritto nei protocolli Plug In Gait, già implementati nel software o che possono essere creati ex novo da colui che conduce l'analisi.

A questo punto nella sezione Resources dell'interfaccia utente si crea un nuovo soggetto partendo da un template preesistente, come per esempio il Plug In Gait Full Body, Plug In Gait Lower Body o il Right Hand, oppure definendone uno nuovo mediante il tasto Create A Blank Subject. Si procede quindi con l'acquisizione delle prove statiche e dinamiche.

- Una volta acquisite le prove si procede con l'elaborazione dei dati acquisiti come la modellizzazione in modalità *Offline* del soggetto; quest'ultima fase non richiede più la presenza del soggetto. La fase statica è di particolare importanza in quanto, durante essa, ad ogni marker viene assegnato il proprio nome adattando un generico marker set a uno specifico paziente. In questo modo avendo già definito il modello, durante le prove dinamiche non sarà più necessario assegnare manualmente il nome ai markers ma questo processo avverrà automaticamente mediante il tasto "Reconstruct and Label". Affinché il sistema memorizzi la configurazione dei markers prima di processare i dati dei dynamics trials è necessario effettuare la calibrazione della prova statica. (Current pipeline → Plug In Gait Static → Processing Static Subject Calibration).

5.2.2 Vicon Procalc

Vicon ProCalc è un'applicazione software che semplifica lo sviluppo, l'implementazione, il testing e l'esecuzione di routine di modelli biomeccanici che calcolano variabili cinematiche, parametri ed eventi in base ai dati letti da un file .c3d, precedentemente generato dal software Vicon Nexus, contenente dati

di movimento 3D. ProCalc si basa su un'interfaccia utente grafica (GUI), che consente di effettuare ed elaborare i dati, e non richiede l'uso di un linguaggio di script. I risultati vengono riscritti su ProCalc o, in alternativa, inviati direttamente a un foglio di calcolo Microsoft Excel, da cui è possibile eseguire ulteriori analisi.

L'interfaccia ProCalc è composta da 3 sezioni, come è possibile vedere in *figura 5.14*:

- **FINESTRA DI CONTROLLO** all'interno della quale è possibile selezionare i dati da processare e scegliere come processarli;
- **3D WORKSPACE** che consente la visualizzazione di ciò che è stato calcolato;
- **OUTPUT LOG** finestra contenente i messaggi di output.

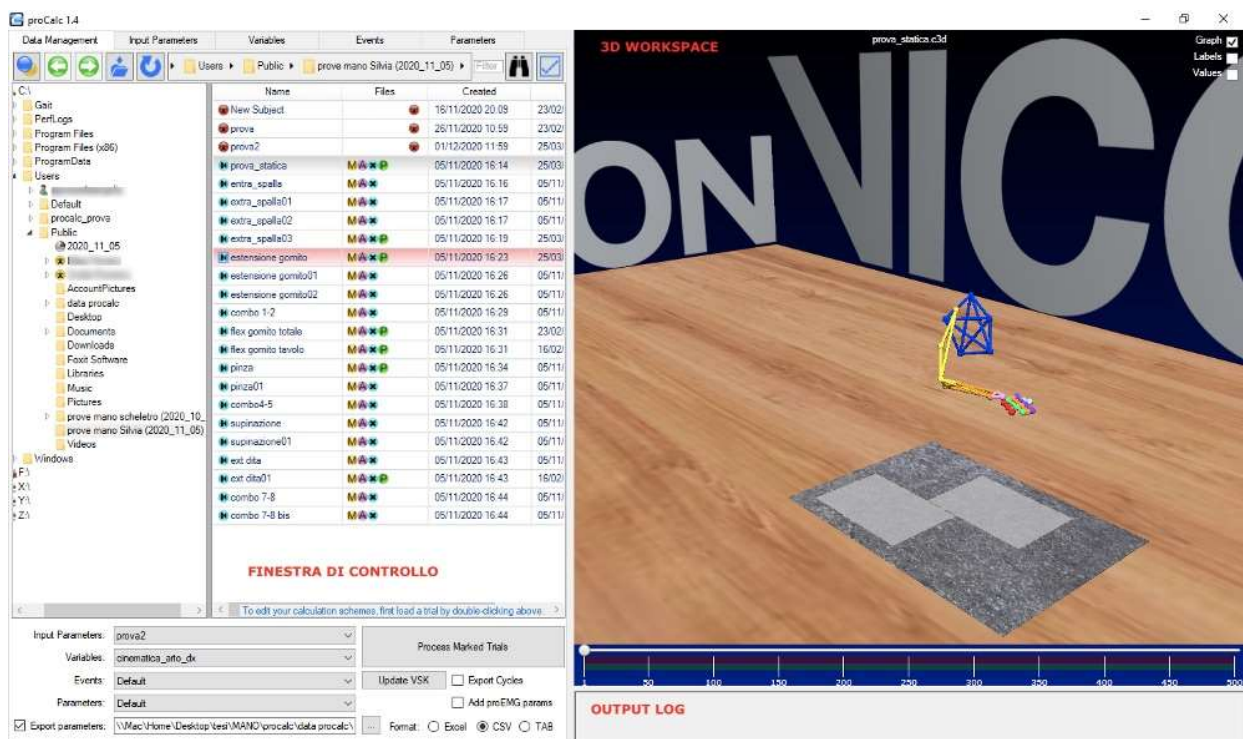


Figura 5.14 Interfaccia utente Vicon Procalc

Le fasi di visualizzazione ed elaborazione dei dati avvengono all'interno della finestra di controllo. Il primo step prevede il caricamento dei dati esplorando tra varie le gerarchie di salvataggio e tra le prove precedentemente acquisite ed elaborate in Nexus.

Una volta scelta e visualizzata la prova nel 3D workspace si procede con la definizione degli input parameters, che rappresentano i parametri che vengono utilizzati come input per tutti gli altri calcoli; esempi di input parameters sono i parametri del soggetto come altezza, peso, shoulder offset etc oppure dei parametri costanti con o senza unità di misura, per esempio il valore di π o come il raggio del marker.

Segue la definizione delle variabili dipendenti dal tempo, indicando la tipologia di variabile e fornendo delle indicazioni rispetto alla variabile stessa; ad esempio se si sceglie come variabile un segmento sarà necessario definirne la posizione e l'orientamento nello spazio.

Infine nelle ultime due sezioni è possibile definire gli eventi, che identificano punti strategici specifici durante una prova di movimento in cui si verifica qualcosa di interessante, e i parametri calcolati da una o più variabili della prova o definite dall'utente, che possono essere parametri oggetto di indagine nell'ambito di un progetto di ricerca in cui vengono eseguiti calcoli statistici sull'output oppure parametri clinicamente rilevanti che vengono confrontati con parametri "normali", per accertare quanto i movimenti del paziente si discostino da essi. Una volta definiti i parametri di input, le variabili, gli eventi e i parametri si torna nella sezione Data Management all'interno della quale avviene il processamento e l'esportazione dei dati in formato .csv in Nexus.

Il modello può essere anche processato direttamente in Nexus, come mostrato in *figura 5.15*: nella sezione Available Operation è possibile selezionare ciascuna operazione che si desidera includere nella pipeline di processamento del trial. Dopo la selezione, le operazioni verranno immediatamente visualizzate nell'elenco nella sezione Pipeline corrente ed eseguite nell'ordine in cui appaiono nella pipeline; è possibile riorganizzare l'ordine delle operazioni, semplicemente trascinandole lungo l'elenco nella posizione desiderata.

La pipeline custom made deve essere salvata come file.pipelines nella cartella ProCalcCl (C:\Users\nomeutente\desktop\Nexus_2\Procalc).

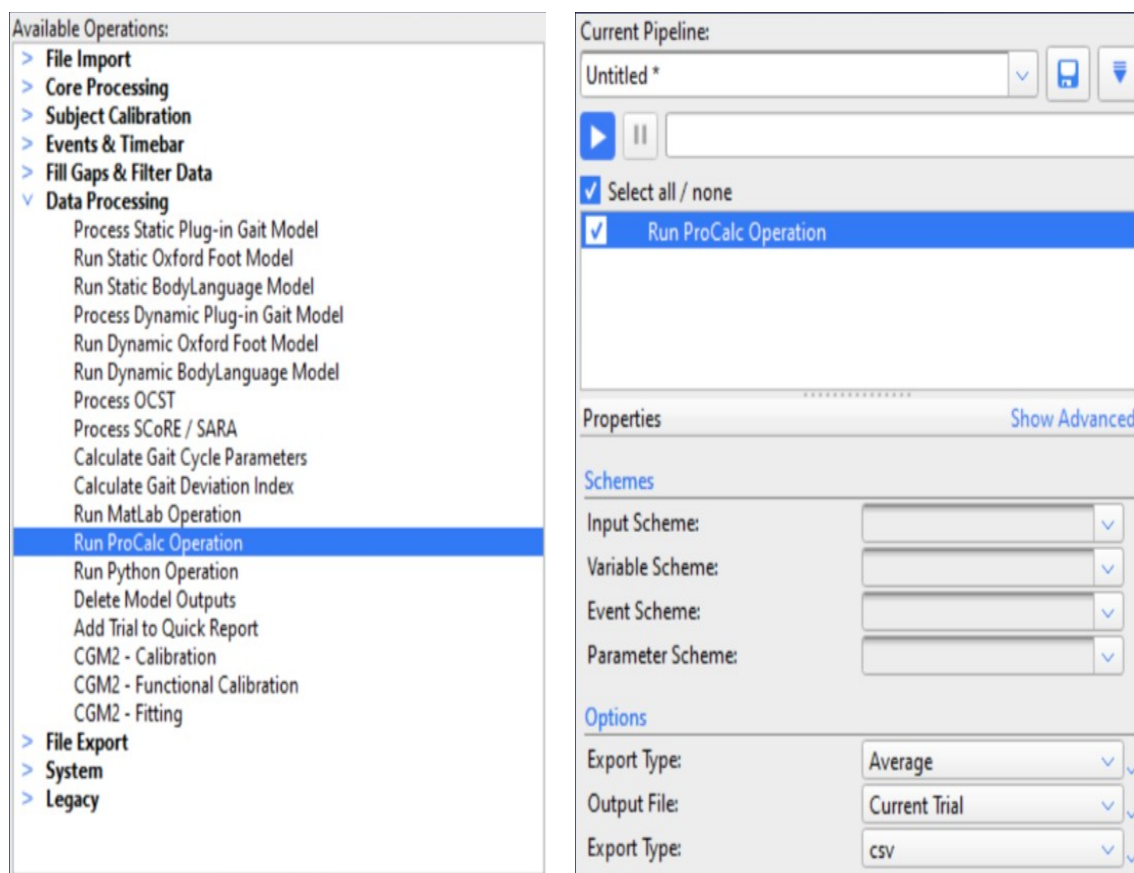


Figura 5.15 Processamento degli output in Nexus

Dopo aver lanciato la pipeline, è possibile osservare nel viewer l'andamento degli output contenuti nella sezione *Model Output*. ProCalc, a differenza di Nexus, salva in automatico i file nel formato .c3d.

6 Sviluppo del Modello

In questo capitolo verranno descritti passo passo gli steps che hanno portato alla creazione del modello cinematico dell'arto superiore.

Partendo dal modello già esistente e implementato in Vicon Nexus, si è sviluppato un nuovo modello che comprendesse anche la mano, precedentemente modellizzata con un unico marker. L'obiettivo è quello di riuscire, mediante il modello, a calcolare la cinematica propria della mano sia su soggetti sani, per verificare la funzionalità del modello stesso, sia su soggetti tetraplegici che hanno subito l'operazione di nerve transfer al fine di quantizzare in maniera oggettiva un eventuale recupero della funzionalità dell'arto superiore.

6.1 Modelli Preesistenti in Vicon Nexus

→ *Plug in Gate Upper Bobby*

Il software Vicon Nexus consente di modellizzare la parte superiore del corpo mediante il seguente marker set che prevede il posizionamento dei marker sulla testa, sul dorso e sull'arto superiore come mostrato in figura 6.1.

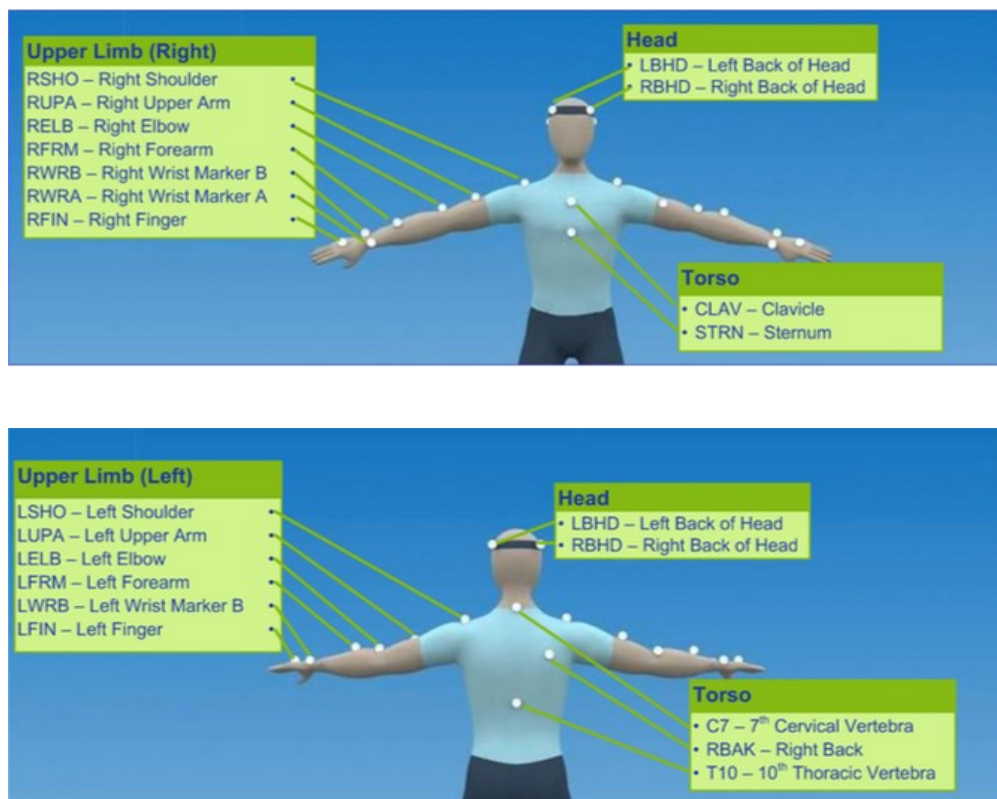


Figura 6.1 Marker set upper body del Plug-in Gate_vista frontale e posteriore. [51]

I markers posizionati sul soggetto sono suddivisi in tre diversi marker set:

– **MARKER SET POSIZIONATI SULLA TESTA**

I quattro markers sono applicati sulla testa, come mostrato in *figura 6.2* mediante l'ausilio di una banda elastica nel seguente modo: due markers posti frontalmente uno in corrispondenza della tempia sinistra e uno in corrispondenza di quella destra (RFHF e LFHF) e altri due marker nella parte posteriore della testa (LBHF e BBHF), uno a sinistra e l'altro a destra, i quali, insieme ai markers frontali, permettono la definizione del piano sagittale della testa.

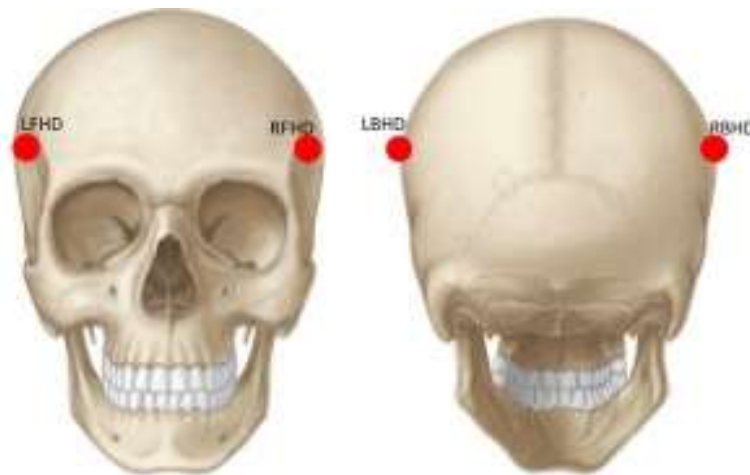


Figura 6.2 Posizionamento dei markers sulla testa [1]

– **MARKER SET POSIZIONATI SUL TORACE**

I marker posizionati sul torace sono cinque, due posti anteriormente e tre posteriormente, e concorrono alla definizione del piano sagittale del torace perciò il loro posizionamento deve essere effettuato con particolare attenzione. I marker sono posizionati anteriormente in corrispondenza della tacca giugulare (*CLAV*), punto di unione tra clavicola e sterno, e del processo xifoideo dello sterno (*STRN*) e posteriormente in corrispondenza della settima vertebra cervicale (C_7), della decima vertebra toracica (T_{10}), e sulla scapola (*RBAK*). Il posizionamento dei marker è mostrato in *figura 6.3*.

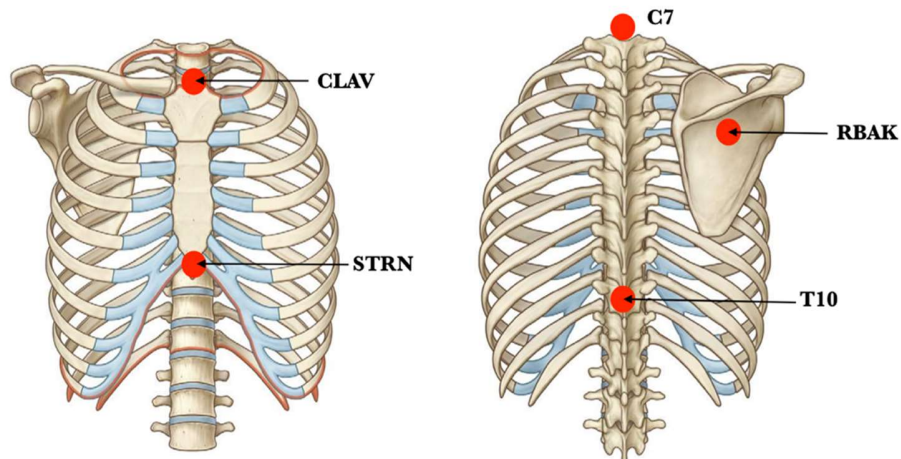


Figura 6.3 Posizionamento dei markers sul torace [1]

– **MARKERS POSIZIONATI SULL'ARTO SUPERIORE**

I markers usati per modellizzare l'arto superiore sono sette e posti simmetricamente a destra e a sinistra. I markers sono posizionati in corrispondenza dell'articolazione acromion-clavicolare (*L/RSHO*), a un terzo della lunghezza del braccio sinistro e/o destro (*L/RUPA*), sull'epicondilo laterale (*L/RELB*), a un terzo della lunghezza dell'avambraccio sinistro e/o destro (*L/RFRM*), in corrispondenza del processo stiloideo di radio (*L/RWRA*) e ulna (*L/RWRB*) e infine sul terzo metacarpo della mano (*RFIN*).

I markers posizionati in corrispondenza del braccio e dell'avambraccio sono facoltativi, ma sono solitamente applicati sul soggetto in quanto il loro utilizzo migliora il tracciamento dei marker durante le prove dinamiche. Il posizionamento dei marker è mostrato in *figura 6.4*.

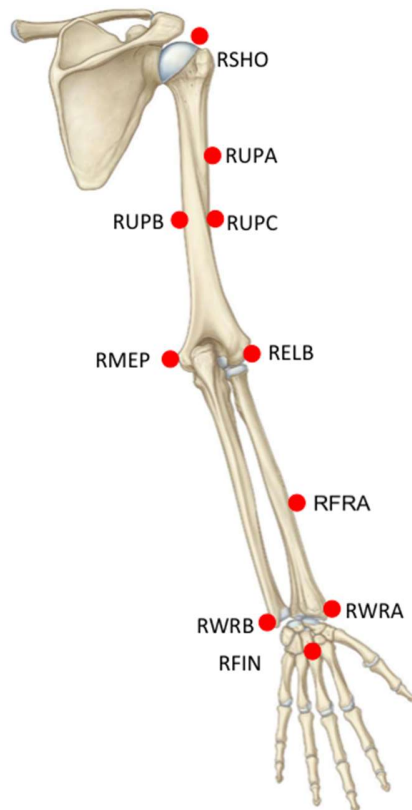


Figura 6.4 Posizionamento dei markers sull'arto superiore_avambraccio supinato [1]

Gli outputs, calcolati come angoli di Eulero in ordine di rotazione YXZ, sono elencati in *tabella 12*.

<i>ANGOLO</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
<i>HEAD ANGLE</i>	Angolo tra la testa e il sistema di coordinate del laboratorio
<i>THORAX ANGLE</i>	Angolo tra il torace e il sistema di coordinate del laboratorio
<i>NECK ANGLE</i>	Angolo tra la testa e il torace
<i>SHOULDER ANGLE</i>	Angolo tra il braccio e il torace
<i>ELBOW ANGLE</i>	Angolo tra il braccio e l'avambraccio

WRIST ANGLE	Angolo tra l'avambraccio e la mano
--------------------	------------------------------------

Tabella 12 Outputs ricavabili dal modello upper body Plug-in Gate

→ *Upper Limb Model*

Esiste una versione più completa del Plug-in Gate che definisce dei marker aggiuntivi per la modellazione dell'arto superiore. L'Upper Limb Model consente una descrizione 3D della cinematica e un'acquisizione del movimento dell'arto superiore più precisa rispetto al Plug-in Gate migliorandone l'analisi successiva. I marker sono applicati al soggetto come mostrato in *figura 6.5*.

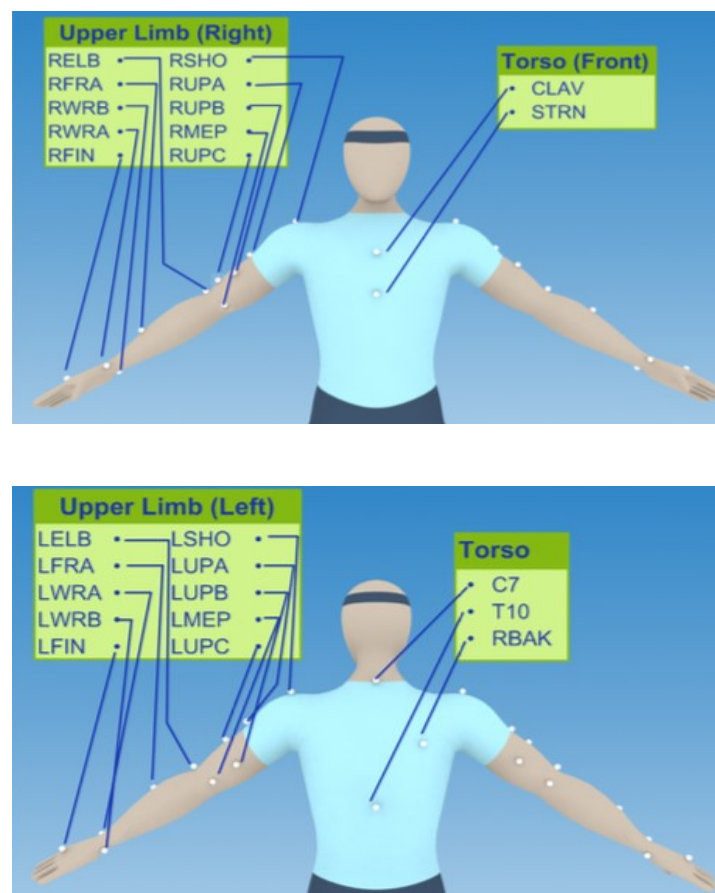


Figura 6.5 Posizionamento marker Upper Limb Model_vista frontale e posteriore [51] [5]

A differenza del Plug-in Gate esistono solo due marker set, il primo prevede il posizionamento dei markers sul torace mentre il secondo sull'arto superiore. I markers applicati sul torace del soggetto sono i medesimi di quelli del modello precedentemente descritto mentre il marker set dell'arto superiore è costituito da 10

markers posizionati come segue: un marker è posizionato in corrispondenza dell'articolazione acromion-clavicolare (L/RSHO), uno a un terzo della lunghezza del braccio sinistro e/o destro (L/RUPA), due marker a metà della lunghezza del braccio sinistro e/o destro disposti rispettivamente medialmente e lateralmente al braccio (L/RUPB e L/RUPC), uno sull'epicondilo laterale (L/RELB) e uno su quello mediale del gomito (L/RMEP), uno a un terzo della lunghezza dell'avambraccio sinistro e/o destro (L/RFRA), uno in corrispondenza del processo stiloideo di radio (L/RWRA), uno in corrispondenza del processo stiloideo di ulna (L/RWRB) e infine uno sul terzo metacarpo della mano (RFIN).

Il posizionamento dei markers sull'arto superiore è mostrato in *figura 6.6*.

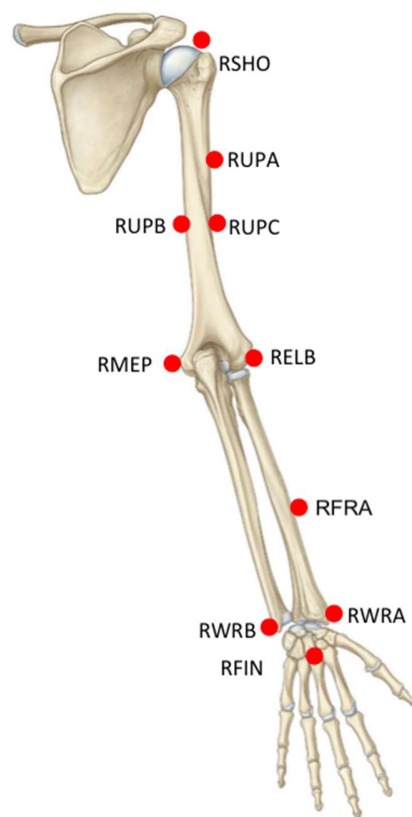


Figura 6.6 Posizionamento marker sull'arto superiore secondo l'Upper Limb Model_ [1]

L'aggiunta dei markers disposti medialmente e lateralmente al braccio (L/RUPB e L/RUPC) e di quello posto medialmente al gomito (L/RMEP) migliorano l'accuratezza della calibrazione delle articolazioni associate all'omero e la qualità del monitoraggio del movimento del soggetto.

L'Upper Limb Model modella l'arto superiore attraverso sette segmenti rigidi quali tronco, braccio destro e sinistro, avambraccio destro e sinistro e mano destra e sinistra.

Complessivamente l'arto superiore presenta sette gradi di libertà per lato ripartiti come segue:

- 3 DoF nella spalla, modellizzata come giunto sferoidale, che consente i movimenti di flesso-estensione, abduzione-adduzione e rotazione esterna-interna;
- 2 DoF nel gomito, modellizzato come un giunto universale, che permette i movimenti di flesso - estensione e di prono – supinazione;
- 2 DoF nel polso, modellizzato come giunto universale che permette i movimenti di flesso-estensione e di deviazione ulnare - radiale.
-

Mediante l'Upper Limb Model è possibile ricavare i seguenti angoli di output calcolati come angoli di Eulero:

<i>ANGOLO DI OUTPUT</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
<i>SHOULDER ANGLE</i>	Angolo tra il braccio e il torace che può essere calcolato come angolo di Eulero 1. con terna di rotazione YZX che richiede un'interpretazione clinica più complessa ma consente di ridurre il problema del blocco del giunto cardanico che si verifica quando, durante l'esecuzione di un movimento, gli assi di rotazione si allineano uno sull'altro. Si verifica perciò una singolarità e il calcolo dell'angolo desiderato diventa inottenibile. 2. con rotazione XZY (che consente i movimenti di flesso-estensione, abd-adduzione e rotazione interna-esterna)
<i>ELBOW ANGLE</i>	Angolo tra il braccio e l'avambraccio: angolo calcolato usando la sequenza di Eulero XZY (che permette i movimenti di flesso-estensione e rotazione interna-esterna)
<i>WRIST ANGLE</i>	Angolo tra l'avambraccio e la mano: angolo calcolato usando la sequenza di Eulero XZY (che consente i movimenti di flesso-estensione e abd-adduzione)

Tabella 13 Output ricavabili dal modello Upper Limb Model

6.2 Sviluppo di un nuovo modello

Una volta analizzati i modelli preesistenti in Vicon Nexus, si è creato un nuovo modello che permettesse l'analisi dei movimenti effettuati durante la fase di riabilitazione nei pazienti che hanno subito l'operazione di nerve transfer così da poter quantizzare matematicamente un eventuale recupero. Poiché l'obiettivo della tesi è quello di creare un modello dell'arto superiore e della mano, si è prestato particolare attenzione al posizionamento dei markers sul torace e sull'arto superiore e come outputs sono stati analizzati gli angoli di spalla, di gomito, di polso e delle dita.

Il modello cinematico dell'arto superiore e della mano sviluppato è composto da 9 segmenti rigidi, descritti da 29 markers di diverse dimensioni applicati su appositi punti di repere anatomici dell'arto superiore destro.

I markers sono posizionati come segue:

- 5 markers di diametro pari a 14 millimetri sul tronco in corrispondenza della tacca giugulare (CLAV), del processo xifoideo dello sterno (STRN), della settima vertebra cervicale (C_7), della decima vertebra toracica (T_{10}) e sulla scapola (RBAK);
- 9 markers di diametro pari a 14 millimetri sull'arto superiore di cui uno in corrispondenza dell'articolazione acromion-clavicolare destra (RSHO) e uno in corrispondenza dell'articolazione acromion-clavicolare sinistra (LSHO), uno a un terzo della lunghezza del braccio destro (RUPA), uno sull'epicondilo laterale (RELB) e uno su quello mediale del gomito (RELB2), uno a un terzo della lunghezza dell'avambraccio destro (L/RFRM), uno in corrispondenza del processo stiloideo di ulna (RWRA), uno in corrispondenza del processo stiloideo di radio (RWRB) e infine uno centralmente sul dorso della mano (RFIN). È possibile effettuare il medesimo montaggio anche sull'arto superiore sinistro.
- 15 marker di diametro pari a 6 millimetri disposti a gruppi di tre su ogni dito come segue: uno in corrispondenza della articolazione metacarpo-falangea, uno in corrispondenza dell'articolazione interfalangea prossimale e infine il terzo in corrispondenza della falange distale delle dita.

Il posizionamento dei markers sopra descritto è osservabile in *figura 6.7 e 6.8*.

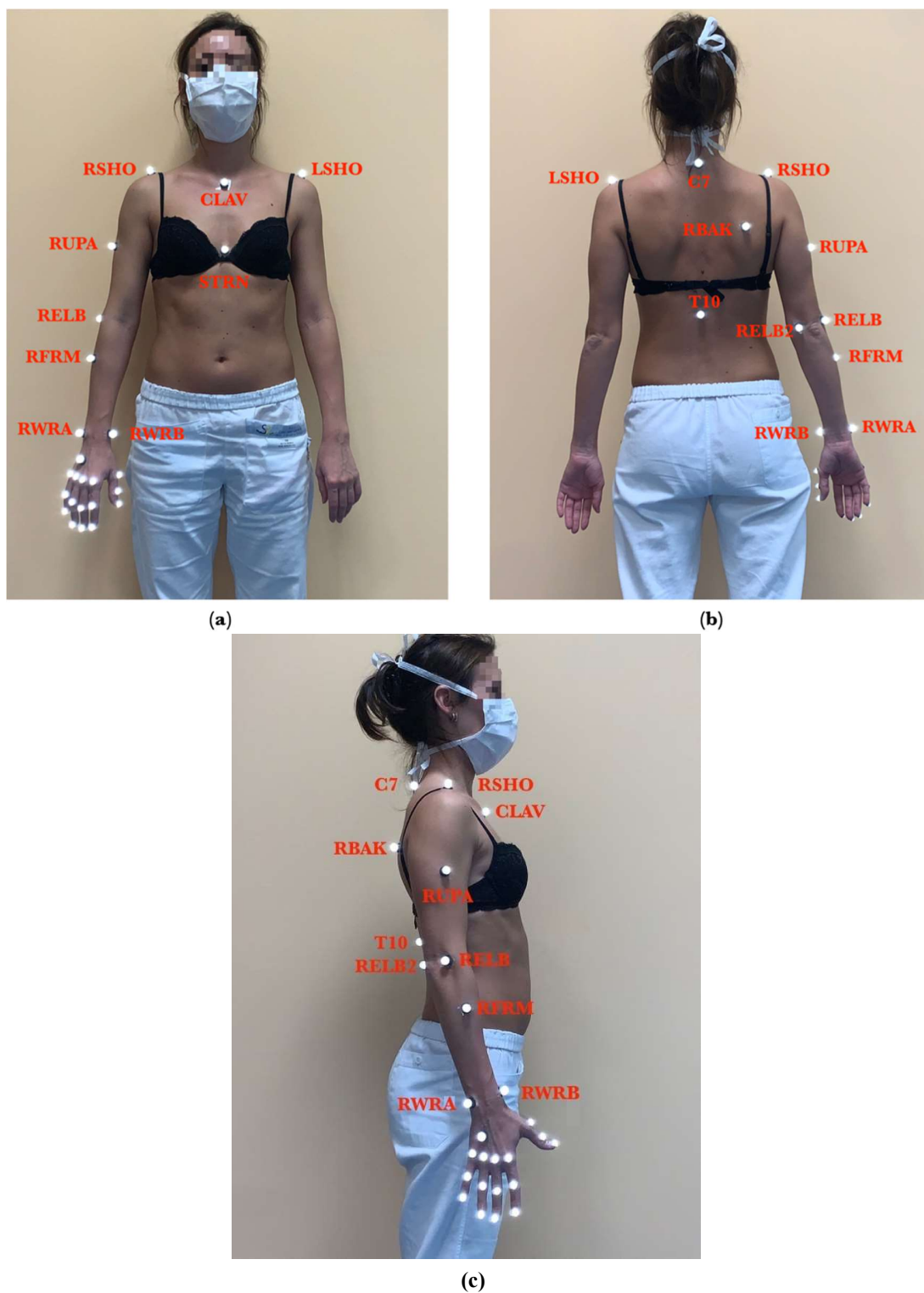


Figura 6.7 Posizionamento dei markers come descritto dal nuovo modello progettato: (a) Posizionamento markers frontale, (b) posizionamento markers posteriore, (c) posizionamento markers sul soggetto posto di profilo

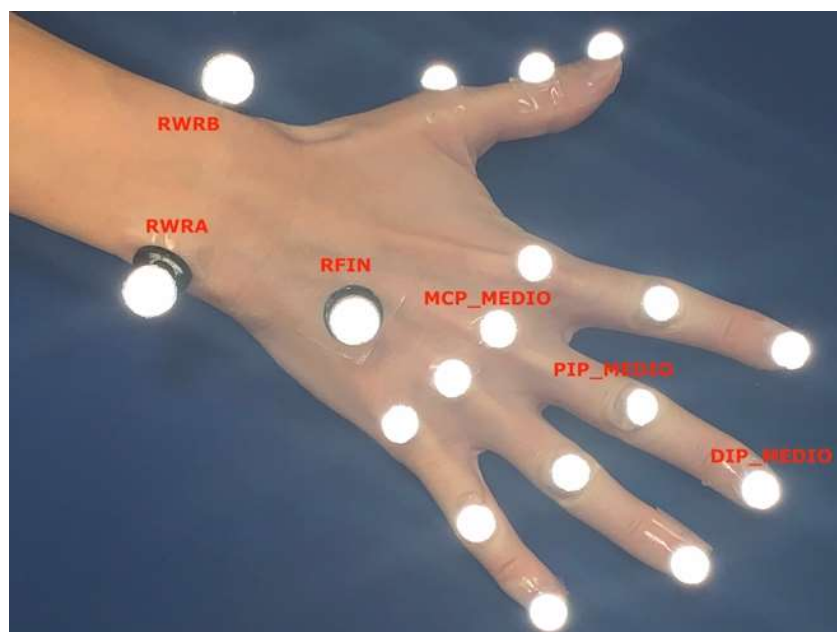


Figura 6.8 Posizionamento dei markers sulla mano come descritto dal nuovo modello progettato

NOME MARKER	POSIZIONAMENTO	SEGMENTO ANATOMICO
CLAV	Tacca giugulare	TRONCO
STRN	Processo Xifoideo dello Sterno	
T₁₀	Decima Vertebra Toracica	
RBAK	Scapola	
C₇	Settima Vertebra Cervicale	
R/LSHO	Articolazione acromion-clavicolare destra/sinistra	BRACCIO
RUPA	A un terzo della lunghezza del braccio destro	

RELB₂	Epicondilo mediale	AVAMBRACCIO
RWRA	Processo stiloideo di ulna	
RWRB	Processo stiloideo di radio	
RFRM	A un terzo della lunghezza dell'avambraccio destro	
RFIN	Centralmente sul dorso della mano	DORSO MANO
MCP_T	Articolazione metacarpo-falangea del pollice	POLLICE
PIP_T	Articolazione interfalangea prossimale del pollice	
DIP_T	Sulla falange distale del pollice	
MCP_I	Articolazione metacarpo-falangea dell'indice	INDICE
PIP_I	Articolazione interfalangea prossimale dell'indice	
DIP_I	Sulla falangea distale dell'indice	
MCP_M	Articolazione metacarpo-falangea del medio	MEDIO
PIP_M	Articolazione interfalangea prossimale del medio	
DIP_M	Sulla falange distale del medio	

MCP_A	Articolazione metacarpo-falangea dell'anulare	ANULARE
PIP_A	Articolazione interfalangea prossimale dell'anulare	
DIP_A	Articolazione interfalangea distale dell'anulare	
MCP_Mi	Articolazione metacarpo-falangea del mignolo	MIGNOLO
PIP_Mi	Articolazione interfalangea prossimale del mignolo	
DIP_Mi	Sulla falange distale del mignolo	

Tabella 14 Tabella riassuntiva del posizionamento dei markers

6.2.1 Acquisizione e analisi della prova statica

Dopo aver definito il marker set da usare e applicati i markers sul soggetto, si procede con la cattura e il processamento della prova statica. La prova statica consiste nella registrazione del paziente fermo nella posizione di riferimento con l'obiettivo di visualizzare tutti i markers, che durante le prove dinamiche potrebbero occludersi a causa del movimento, e di associare manualmente il nome ai markers ricreando così il modello scelto.

La **posizione statica di riferimento** prevede che il soggetto sia seduto con il braccio flesso a 90° e l'avambraccio e la mano poggiate sulla scrivania posta di fronte al soggetto e all'interno del volume di cattura delle telecamere. Dopo avere registrato la prova statica, si ricostruisce il posizionamento dei markers mediante la pipeline *Reconstruct* così da assicurarsi che tutti i markers siano visibili nello spazio di cattura; ciò che si osserva nel viewer dopo aver lanciato la pipeline è mostrato in *figura 6.9*.

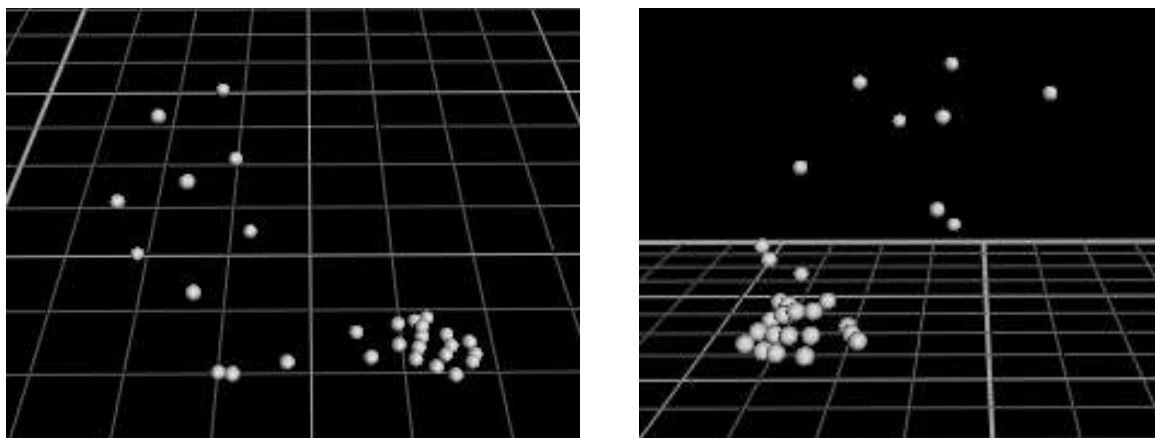


Figura 6.9 Ricostruzione della posizione dei markers nella prova statica

Per poter assegnare correttamente il nome ai markers è necessario innanzitutto creare i segmenti associati ai vari distretti anatomici.

Nella sezione *Labeling Template Builder*, si immette il nome del segmento anatomico che si vuole definire e nel viewer, impostato in modalità 3D perspective, si seleziona il maker che rappresenta l'origine del parent segment. Quando il marker di origine viene selezionato, una sfera rossa lo circonda indicando che è stato assegnato. Successivamente il puntatore ToolTip seleziona un secondo marker definito come “marker dell'asse primario”, il quale seleziona l'asse principale del segmento che tipicamente corrisponde alla lunghezza del segmento anatomico; una volta selezionato, una sfera verde lo circonda e tra il marker di origine e questo marker dell'asse primario viene creato un collegamento. Dal momento che un segmento è definito quando sono selezionati almeno tre markers, dopo aver selezionato il marker di origine del segmento e il segmento che definisce la lunghezza del segmento stesso, si procede con la selezione del “marker dell'asse secondario” che permette di definire completamente il segmento. Quando il marker è selezionato, una sfera blu lo circonda e nel viewer vengono visualizzati ulteriori collegamenti tra i vari markers.

È possibile definire un numero qualsiasi di markers aggiuntivi ripetendo questo passaggio senza influire sul sistema di coordinate del segmento, come mostrato in *figura 6.10*.

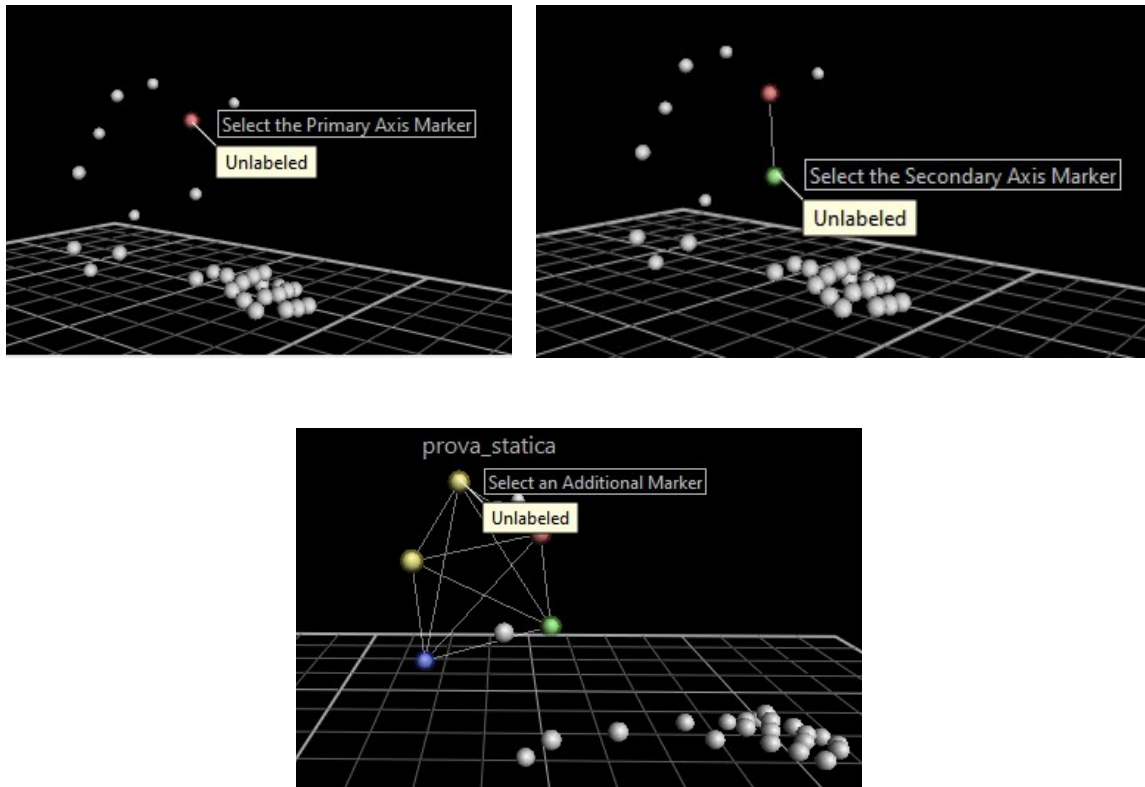


Figura 6.10 Selezione dei markers per la creazione dei segmenti

Dopo aver selezionato tutti i marker che devono essere collegati per la creazione del segmento, nella sezione *Labeling Template Builder*, si clicca sul tasto *Create* e nel viewer il segmento verrà automaticamente generato (figura 6.11).

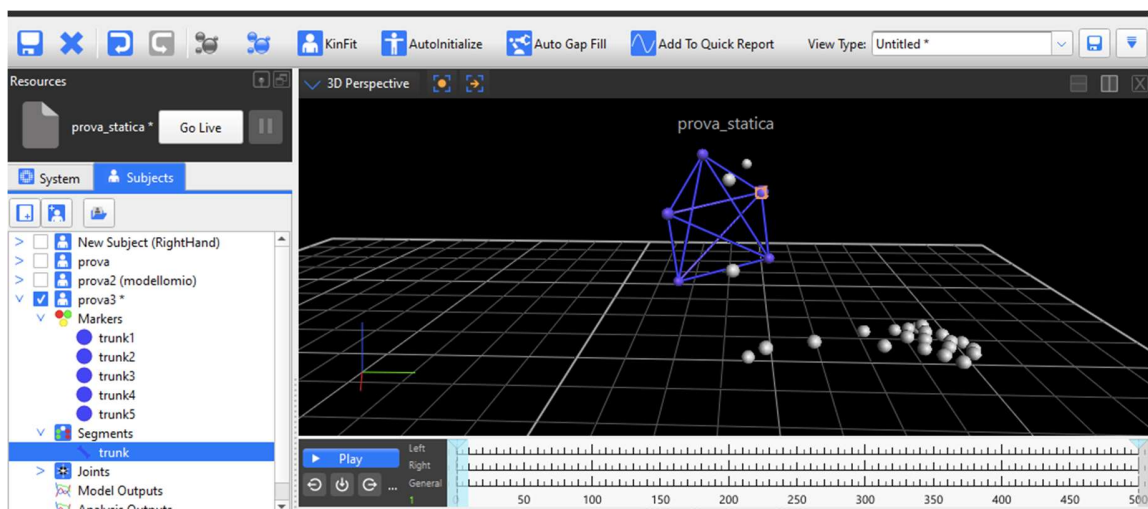


Figura 6.11 Visualizzazione del segmento generato nel viewer

Una volta definiti i vari segmenti, è possibile anche rinominare i vari markers con i nomi precedentemente definiti nel modello, come si osserva in *figura 6.12*.

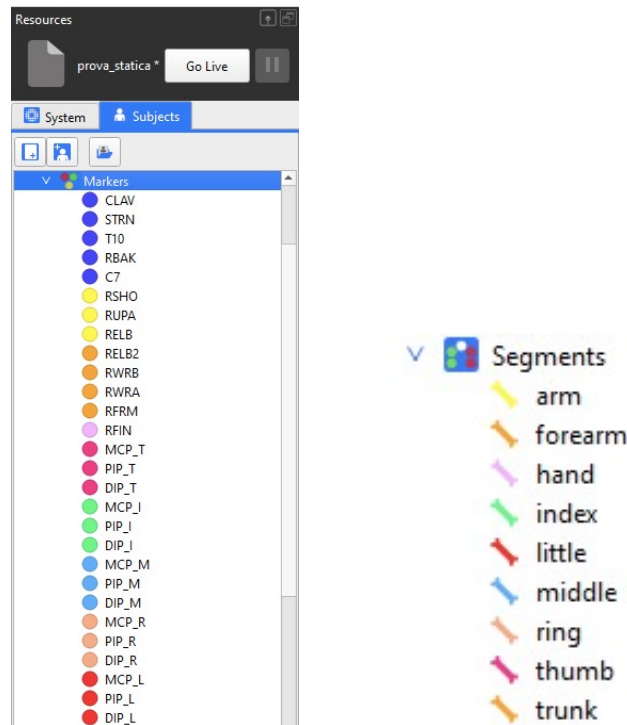


Figura 6.12 Assegnazione dei nomi del modello ai marker dei vari segmenti

Al termine dell'operazione il modello si presenta come mostrato in *figura 6.13*:

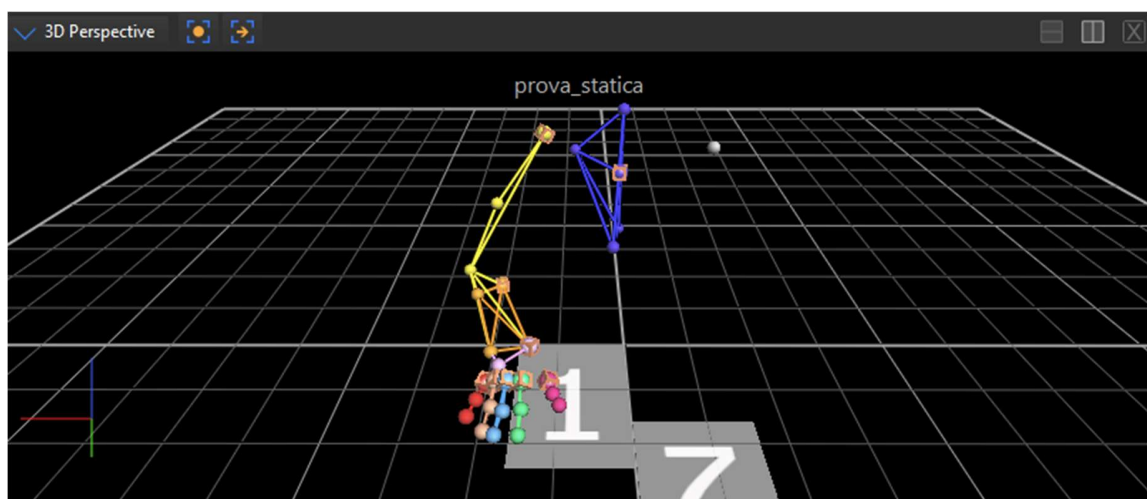


Figura 6.13 Definizione dei veri segmenti anatomici

È necessario stabilire un collegamento tra i vari segmenti: il software Nexus fornisce quattro diverse tipologie di giunti attraverso cui collegarli.

La scelta del giunto appropriato avviene all'interno della sezione *Labeling Template Builder*, selezionando dall'elenco *Link Segments* il tipo di giunto desiderato; i giunti possono avere fino a sei gradi di libertà (DoF) e la scelta dipende dalla libertà di movimento del child segment rispetto al parent segment.

Esistono quattro diverse tipologie di giunti selezionabili nel software Vicon Nexus:

1. **Ball joint (Giunto sferico):** giunto a 3 DoF con piena libertà di rotazione ma non di traslazione. Questo tipo di giunto definisce la posizione del child segment partendo dalla posizione del parent segment, ma il suo orientamento può variare liberamente. È generalmente utilizzato per collegare due segmenti che condividono almeno un marker. Esso viene perciò utilizzato per collegare il braccio con l'avambraccio, l'avambraccio con il dorso della mano e il dorso della mano con le dita.
2. **Free joint (Giunto libero):** giunto a 6 DoF con piena libertà di traslazione e rotazione. È solitamente utilizzato per collegare due segmenti che non condividono alcun marker. Esso viene utilizzato nel modello per collegare il tronco con il braccio.
3. **Hardy Spicer joint:** giunto a 2 DoF con libertà di rotazione attorno a due assi. Questo tipo di giunto ha due vettori perpendicolari che definiscono le direzioni dei due assi attorno ai quali il giunto può ruotare.
4. **Hinge joint (Giunto a cerniera):** giunto a 1 DoF con libertà di rotazione attorno a un unico asse. Questo giunto ha un unico vettore che definisce l'asse della cerniera.

I giunti di tipo Hardy Spicer e Hinge sono solo per uso avanzato e non sono stati applicati per collegare i segmenti del modello creato.

Il collegamento dei vari segmenti avviene definendo il parent segment dell'articolazione, tipicamente il segmento prossimale, che si vuole collegare al child segment, rappresentato dal segmento distale. Quando il segmento è selezionato con successo, un riquadro rosso circonda il parent segment, indicando che la selezione è avvenuta con successo.

Se più di un marker è condiviso tra i due segmenti collegati, il giunto viene posizionato nel punto medio rispetto a queste posizioni; in caso contrario, il giunto viene creato all'origine del child segment. Il collegamento tra i vari segmenti anatomici è mostrato in *figura 6.14*.

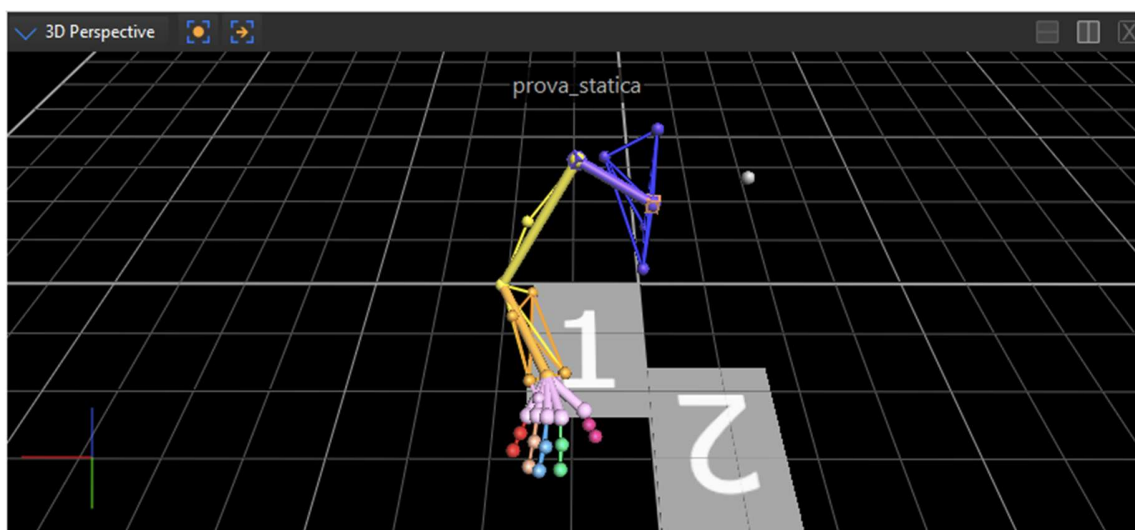


Figura 6.14 Collegamento dei segmenti anatomici attraverso i giunti

Una volta creati i collegamenti mediante i giunti, si effettua il processo di calibrazione statica, lanciando l'apposita pipeline – *Calibrate Labeling Skeleton Static* nella sezione *Tools*- che consente la creazione del Vicon Skeleton (.vsk file) adattato ai parametri anatomici del soggetto stesso definiti durante la fase di creazione del soggetto. Prima di passare all'analisi delle prove dinamiche, la prova statica viene esportata sul software Procalc che permette di orientare correttamente gli assi, altrimenti definiti in maniera casuale su Nexus come mostrato in figura 6.15.

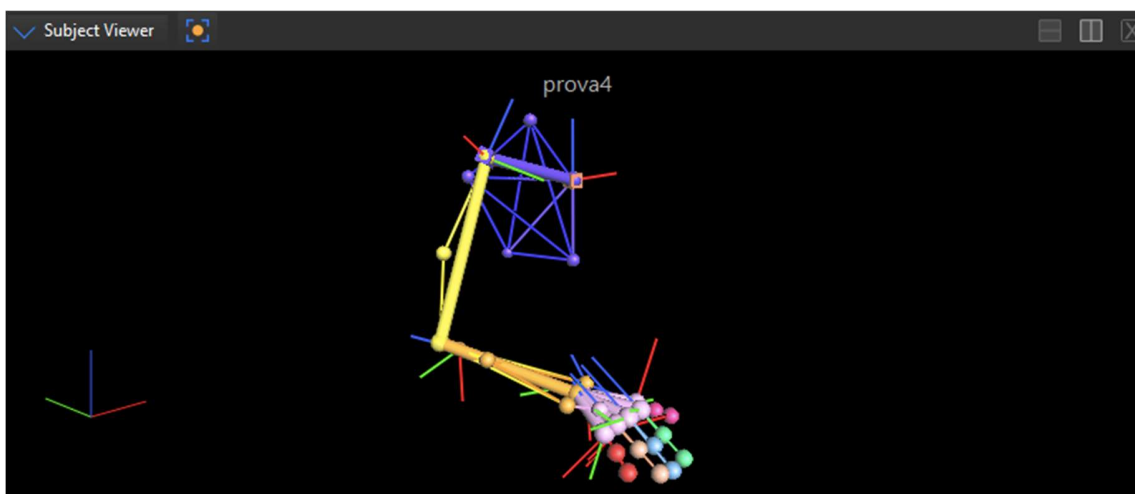


Figura 6.15 Orientazione degli assi dei segmenti in modalità Subject Viewer di Nexus

6.2.2 Definizione della Cinematica dei segmenti anatomici in Procalc

In questo paragrafo viene descritta cinematica del modello precedentemente creato definendo l'orientazione dei segmenti anatomici mediante la convenzione del Software Vicon, secondo la quale l'asse *x* coincide con l'asse *antero - posteriore*, l'asse *y* con quello di *flesso - estensione* e l'asse *z* con l'asse *assiale*, e calcolando gli angoli articolari ricavati dal confronto tra gli orientamenti relativi di due segmenti.

- *Tronco*

L'asse *z*, rivolto verso il basso, è l'asse predominante ed è definito come il vettore che congiunge il secondo punto medio, calcolato tra il marker posizionato in corrispondenza della clavicola e quello in corrispondenza della vertebra cervicale C_7 , al primo punto medio, calcolato tra il marker posizionato sullo sterno e il marker posizionato in corrispondenza della vertebra toracica T_{10} .

Partendo dal cluster di markers, si definiscono altri due punti medi: il primo è come distanza tra il marker posizionato sulla clavicola e quello posto in corrispondenza dello sterno mentre il secondo viene calcolato come distanza tra il marker posizionato sulla vertebra cervicale C_7 e la vertebra toracica T_{10} . Il vettore che unisce i punti medi sopra definiti prende il nome di asse di supporto; esso non è né perpendicolare all'asse *z* né uno degli assi principali ma moltiplicato per l'asse *z* permette di ricavare l'asse di flesso-estensione. Infine l'asse *x* si ricava mediante la regola della mano destra. L'origine del sistema di riferimento del torace viene quindi calcolato in corrispondenza del marker posto sulla clavicola, con un offset pari a metà del diametro del marker lungo l'asse antero-posteriore.

Il sistema di riferimento locale del tronco è mostrato in *figura 6.16*.

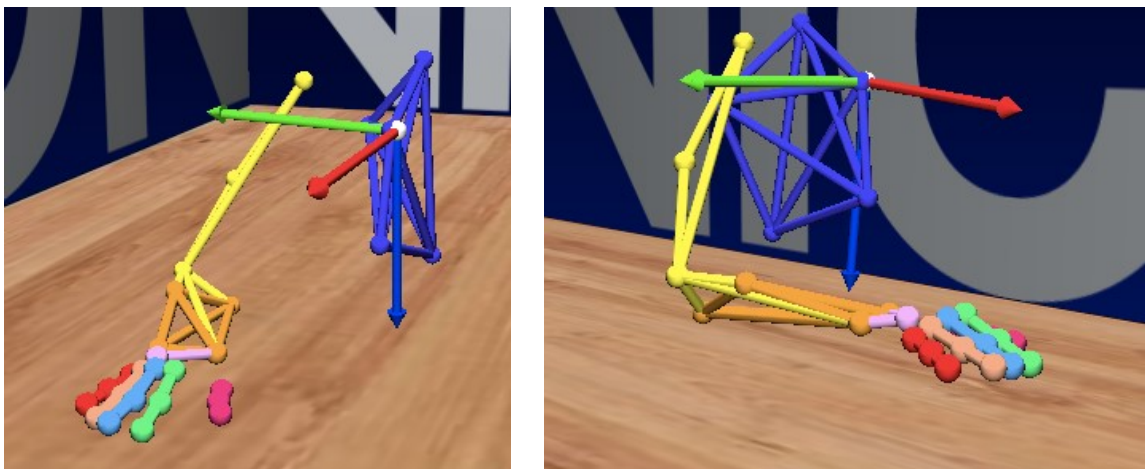


Figura 6.16 Definizione del sistema di riferimento del tronco

- **Braccio**

Per definire gli assi di riferimento nel braccio è innanzitutto necessario definire il centro di articolazione della spalla *SJC*, creato lungo la direzione dell'asse z del sistema di coordinate del tronco e posto rispetto al marker applicato sulla spalla a una distanza pari all'offset di spalla, che viene impostata nella sezione Properties di Nexus e che è variabile da soggetto a soggetto. Il punto *SJC*, precedentemente ricavato, viene identificato come origine del sistema di coordinate del braccio.

L'asse assiale del segmento braccio è calcolato come la congiungente tra centro di articolazione della spalla e quello del gomito; l'asse x viene ricavato dal prodotto vettoriale tra l'asse di supporto del gomito, che è il vettore che congiunge il punto medio del gomito con il marker posizionato sull'epicondilo laterale *ELB*, e l'asse z. L'asse y viene calcolato come prodotto vettoriale tra i due assi precedentemente calcolati. Il sistema di riferimento locale del braccio è mostrato in figura 6.17

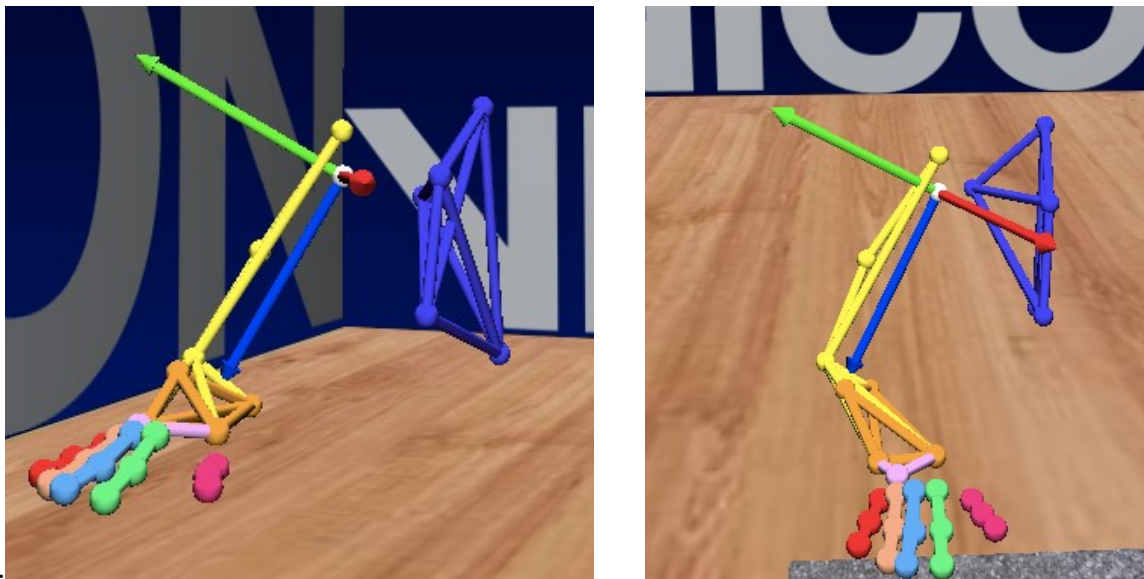


Figura 6.17 Definizione del sistema di riferimento del braccio

- **Avambraccio**

L'origine del segmento avambraccio coincide con il centro di articolazione del gomito *EJC*, calcolato come punto medio tra i due marker posti sull'epicondilo laterale e mediale del gomito. L'asse z è definito come il vettore che congiunge il centro dell'articolazione del gomito con il centro dell'articolazione del polso; l'asse x è ricavato dal prodotto vettoriale tra l'asse di supporto

del polso, che è il vettore che congiunge il centro dell'articolazione del gomito con il marker posto in corrispondenza dell'epicondilo laterale del gomito, e l'asse z precedentemente definito.

L'asse y corrispondente all'asse di flessione - estensione viene calcolato attraverso la regola della mano destra mediante il prodotto vettoriale tra l'asse assiale e l'asse antero-posteriore. Il sistema di riferimento locale dell'avambraccio è rappresentato in figura 6.18.

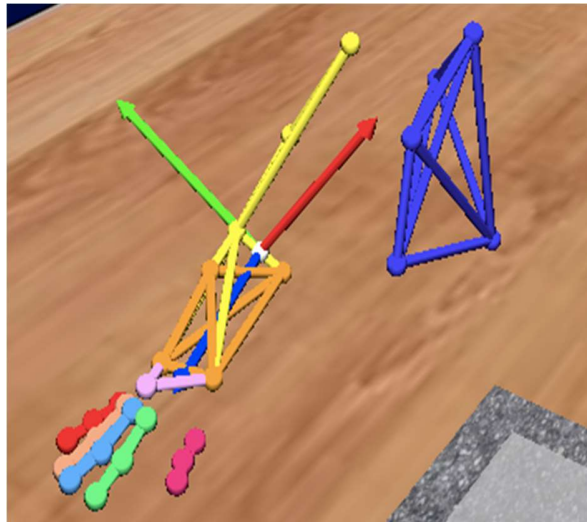


Figura 6.18 Definizione del sistema di riferimento dell'avambraccio

- **Dorso della Mano**

L'origine del sistema di riferimento della mano è il centro di articolazione della mano WJC che è calcolato come il punto medio tra i marker posizionati sul polso, WRA e WRB.

L'asse z è il vettore che congiunge il centro di articolazione del polso (WRJ) con il centro di articolazione della mano (HRJ), calcolato come il punto medio tra il marker posizionato in corrispondenza del processo stiloideo del radio e il marker posto centralmente alla mano; l'asse x è definito come prodotto vettoriale tra l'asse di supporto della mano, vettore che unisce il centro di articolazione della mano con il marker posto in corrispondenza del processo stiloideo di radio WRB, e l'asse Z precedentemente calcolato. L'asse y è ricavato attraverso il prodotto vettoriale tra gli altri due assi.

Il sistema di riferimento locale dell'avambraccio è rappresentato in figura 6.19.

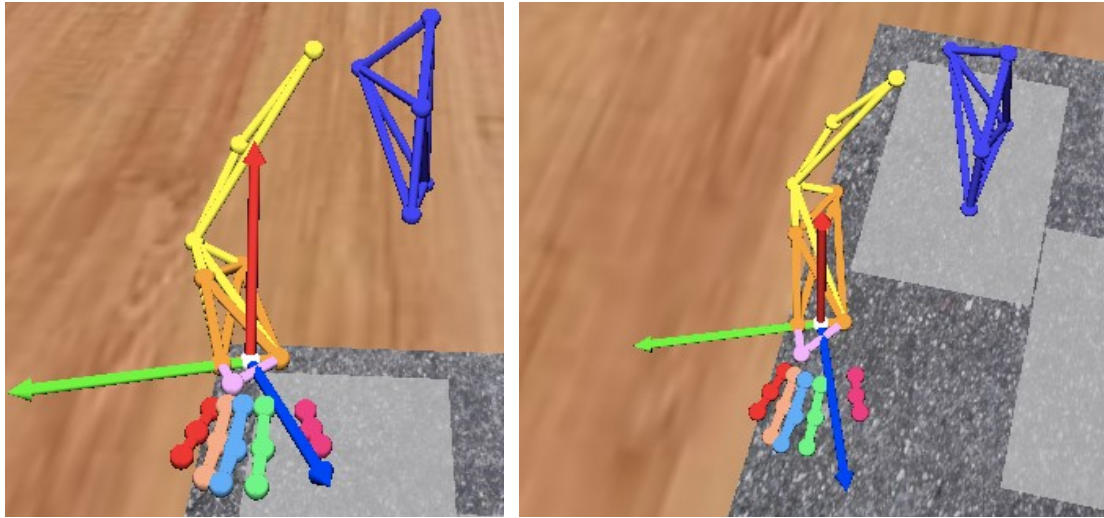


Figura 6.19 Definizione del sistema di riferimento dell'avambraccio

Per la definizione degli assi della mano si è fatto riferimento allo studio di Carpinella e colleghi esposto nell'articolo [52].

- Dita Lunghe della mano

L'origine dell'indice e di ogni dito lungo coincide con l'articolazione metacarpo falangea (MCP). L'asse z è il vettore che congiunge l'articolazione metacarpo falangea MCP del dito con la sua articolazione distale DIP; l'asse x è definito come prodotto vettoriale tra l'asse di supporto, vettore congiungente dei vari marker posizionati sulle articolazioni metacarpo falangee delle dita, e l'asse z precedentemente calcolato. L'asse y è ottenuto come prodotto vettoriale degli altri due assi. Il sistema di riferimento locale dell'avambraccio è rappresentato in *figura 6.20*.

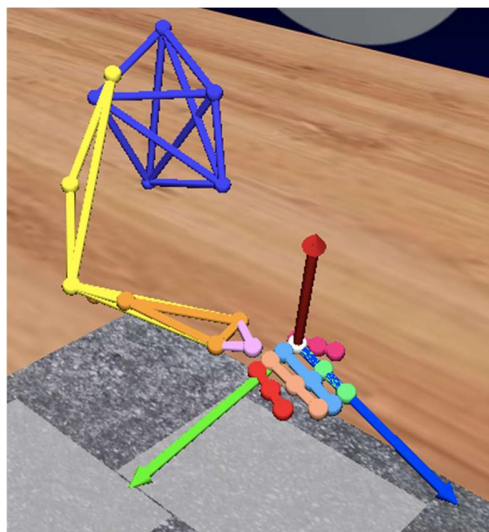


Figura 6.20 Definizione del sistema di riferimento dell'indice

- Pollice

L'origine del pollice coincide con la sua articolazione metacarpo falangea (MCP). L'asse z è il vettore che congiunge l'articolazione metacarpo falangea MCP del pollice con l'articolazione distale del pollice stesso DIP; l'asse x è definito come prodotto vettoriale tra l'asse di supporto del pollice, vettore che unisce l'articolazione metacarpo falangea del pollice (MPC_p) con il marker posizionato al centro del dorso della mano (RFIN), e l'asse Z precedentemente calcolato. L'asse y ottenuta attraverso il prodotto vettoriale tra gli altri due assi precedentemente definiti.

Il sistema di riferimento locale dell'avambraccio è rappresentato in *figura 6.21*.

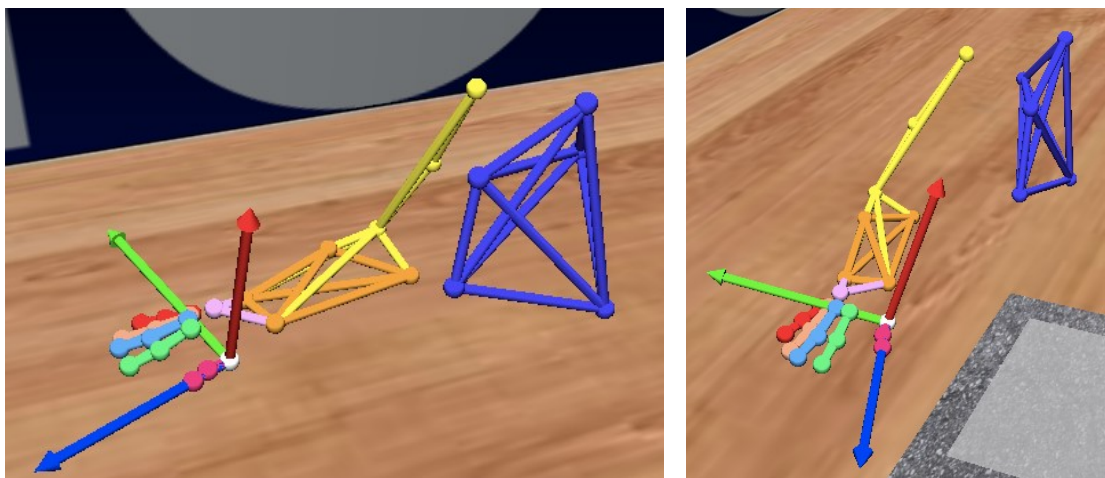


Figura 6.21 Definizione del sistema di riferimento dell'indice

Una volta definiti i sistemi di riferimento anatomici per i segmenti di tronco, braccio, avambraccio, mano, pollice e dita lunghe della mano si procede con la definizione degli angoli articolari che vengono calcolati come angoli cardanici del tipo YXZ confrontando tra l'orientamento relativo del segmento distale (child) rispetto a quello prossimale (parent) dell'articolazione.

La rotazione del tipo YXZ coincide con i seguenti movimenti planari:

- Y: *Flesso/Estensione*, movimento relativo di un segmento rispetto all'altro nel piano sagittale;
- X: *Abduzione/Adduzione*, movimento relativo di un segmento rispetto all'altro nel piano frontale;
- Z: *Intra/Extrarotazione* oppure *Prono/Supinazione*, movimento relativo di un segmento rispetto all'altro nel piano trasversale.

Gli angoli di output ricavati dal modello sono elencati e descritti nella *Tabella 15*:

<i>ANGOLO DI OUTPUT</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
<i>ANGOLO DI SPALLA</i>	Angolo tra il braccio (child) e il torace (parent)
<i>ANGOLO DI GOMITO</i>	Angolo tra il braccio (parent) e l'avambraccio (child)
<i>ANGOLO DI POLSO</i>	Angolo tra l'avambraccio (parent) e il polso (child)
<i>THUMB_ANGLE</i>	Angolo tra il polso (parent) e il pollice (child)
<i>INDEX_ANGLE</i>	Angolo tra il polso (parent) e l'indice (child)
<i>MIDDLE_ANGLE</i>	Angolo tra il polso (parent) e il pollice (child)
<i>RING_ANGLE</i>	Angolo tra il polso (parent) e l'anulare (child)
<i>LITTLE_ANGLE</i>	Angolo tra il polso (parent) e il mignolo (child)

Tabella 15 Output ricavabili dal modello custom made

Dopo aver definito in Procalc i segmenti anatomici e la loro orientazione nello spazio e gli angoli, nella sezione *Data Management* di *Procalc* si apre nel workspace la prova che si desidera analizzare e successivamente, dopo aver selezionato l'*input parameter* e le *variables* di interesse da processare si procede con il processamento della prova cliccando sui tasti "*Process Mark Trial*" e "*Update Vsk*".

Terminate queste operazioni si ritorna in Nexus dove, una volta aperta la prova precedentemente marcata e processata in Procalc, si visualizzano gli angoli di output.

7 Prove Sperimentali

In questo capitolo verranno descritti tasks di movimenti effettuati dai soggetti sani per verificare il funzionamento del modello e prove specifiche effettuate durante la fase di riabilitazione post intervento per verificare l'eventuale recupero muscolare.

7.1 Strumentazione e Soggetti

Le prove che verranno successivamente descritte sono state acquisite mediante la seguente strumentazione:

- 8 telecamere IR Vicon di cui 6 disposte lungo il perimetro del laboratorio del passo dell'U.S.U e 2 poste su appositi treppiedi così da restringere il volume di cattura della prova;
- 2 telecamere ad elevata risoluzione HD per le riprese video della prova;
- una scrivania che funge da supporto al soggetto durante i tasks di movimento;
- al soggetto è richiesto di sedersi su una sedia posta di fronte alla scrivania così da valutare il funzionamento del modello anche per il soggetto tetraplegico;
- markers set costituito da 29 markers di diametro pari a 14 mm, per i marcatori posti in corrispondenza del tronco, del braccio, dell'avambraccio e del dorso della mano e di diametro pari a 6 mm per quelli posizionati in corrispondenza delle dita della mano. Tutti i markers sono posizionati sugli appositi punti di repere attraverso nastro biadesivo.

I test, che verranno successivamente descritti, sono stati registrati su 3 soggetti sani di sesso femminile. In *tabella 14* oltre ai dati personali dei soggetti sono state riportate le definizioni e i valori delle misure antropometriche, acquisite mediante un metro, prima di procedere con le prove. Ai soggetti è stato richiesto di eseguire i vari test a torso nudo cosicché i vestiti non generassero artefatti durante il posizionamento dei markers sui punti di repere. È consigliabile segnare i punti di repere mediante una matita dermografica in modo che, qualora un marcatore cada dalla sua posizione durante l'acquisizione, possa essere facilmente riposizionato.

		DEFINIZIONE	SOGGETTI		
			S ₁	S ₂	S ₃
Dati personali	ETÀ	-	29	29	30
	ALTEZZA (cm)	-	159	172	167
	PESO (kg)	-	50	68	60
Misure antropometriche	SHOULDER OFFSET (mm)	Distanza verticale dal centro dell'articolazione gleno-omeroale al marker posto sulla spalla (RSHO e LSHO).	50	50	50
	LUNGHEZZA BRACCIO (mm)	Distanza dal processo acromiale all'epicondilo laterale	280	350	280
	LUNGHEZZA AVAMBRACCIO (mm)	Distanza dall'epicondilo laterale al processo stiloideo dell'ulna	245	245	235
	LUNGHEZZA MANO (mm)	Distanza tra l'estremità del dito medio e il processo stiloideo dell'ulna	160	170	180

Tabella 16 Tabella con dati personali e misure antropometriche dei soggetti

7.2 Task di movimento

La fase che segue l'acquisizione e la successiva analisi della prova statica prevede la registrazione e il processamento delle prove dinamiche effettuate dal soggetto.

Le prove dinamiche, effettuate durante il seguente lavoro di tesi, si suddividono in due diverse tipologie: le prime prove condotte hanno l'obiettivo di analizzare l'intero range of motion (RoM) dell'arto superiore al fine di verificare il corretto funzionamento del modello creato mentre le seconde prove sono state effettuate riproducendo i movimenti che i soggetti compiono durante la fase riabilitativa al fine di quantificare l'eventuale recupero post-operatorio. Prima di registrare le prove dinamiche bisogna assicurarsi che tutti i markers siano posizionati correttamente sul soggetto, in accordo con il marker set

precedentemente definito e con la prova statica precedentemente registrata, e che siano visibili nello spazio di cattura durante l'esecuzione dei movimenti. Una volta verificato ciò, si procede con l'acquisizione delle prove dinamiche. I movimenti condotti dal soggetto al fine di verificare la correttezza del modello creato sono:

1. EXTRAROTAZIONE DI SPALLA

Al soggetto su cui sono stati posizionati i marker è chiesto di effettuare una extrarotazione di spalla al fine di verificare che RoM sia di circa 80° . (*figura 7.1*)



Figura 7.1 Extrarotazione di spalla

2. ESTENSIONE DI GOMITO

L'estensione di gomito è stata effettuata in tre differenti modi: pro gravità, anti gravità e su un piano neutro (*figura 7.2, figura 7.3, figura 7.4*). Anche in questo caso l'obiettivo era quello di verificare che il modello riuscisse a riprodurre il RoM fisiologico.



Figura 7.2 Estensione gomito pro gravità



Figura 7.3 Estensione gomito piano neutro



Figura 7.4 Estensione di gomito anti gravità

3. FLESSIONE DI GOMITO

Al soggetto su cui sono stati posizionati precedentemente i markers, è richiesto di effettuare il movimento di flessione di gomito come mostrato in *figura 7.5* con l'obiettivo di verificare che il valore della flessione sia intorno ai 145°.



Figura 7.5 Flessione di gomito

4. FLESSIONE COMBINA DEL DITO INDICE E DEL POLLICE (PINCH)

Al soggetto è richiesto di effettuare il movimento di flesso - estensione combinata del pollice e dell'indice (*figura 7.6*). Anche in questo caso si verifica che il movimento riproduca il range fisiologico garantendo l'efficacia del modello.



Figura 7.6 Flessione ed Estensione combinata di indice e pollice

5. PRONO-SUPINAZIONE DELL'AVAMBRACCIO

Al soggetto è stato richiesto di effettuare il movimento di supinazione dell'avambraccio, come mostrato in *figura 7.7*, così da verificare che il modello registrasse correttamente il movimento e calcolasse l'angolo di prono - supinazione in maniera corretta e rispecchiando i valori fisiologici (movimento di prono-supinazione pari a circa 180°).



Figura 7.7 Prono-Supinazione dell'avambraccio

6. ESTENSIONE DELLE DITA

Al soggetto viene richiesto di effettuare l'estensione delle dita della mano (*figura 7.8*), verificando che il movimento registrato sia nel range fisiologico (Flessione pari a circa 90° mentre l'estensione attiva deve essere compresa tra i 30 e i 40°)



Figura 7.8 Estensione delle dita della mano

Per effettuare un'analisi clinica, oltre alla valutazione del RoM dei movimenti sopra descritti, sono state analizzate anche delle combinazioni di movimenti puri, che permettono di valutare il recupero muscolare in seguito all'operazione di nerve transfer del muscolo ricevente e di rieducare altri muscoli a svolgere l'azione donatore.

I movimenti combinati sono:

7. EXTRAROTAZIONE DI SPALLA COMBINATA ALL'ESTENSIONE DI GOMITO (12)

È stato richiesto al soggetto di effettuare il movimento di extrarotazione di spalla contemporaneamente all'estensione di gomito. La tipologia di movimento è mostrata in *figura 7.9*.



Figura 7.9 Extrarotazione di spalla combinata all'estensione di gomito

8. FLESSIONE DEL GOMITO COMBINATA AL MOVIMENTO DI PINZA DELLE DITA DELLE MANI (COMBO 34)

Durante la flessione del gomito, il soggetto effettua con l'indice e il pollice il movimento della pinza (pinch).



Figura 7.10 Flessione del gomito combinata al movimento di pinza

9. PRONO-SUPINAZIONE DELL'AVAMBRACCIO COMBINATA ALL'ESTENSIONE DELLE DITA (COMBO 56)

Durante il movimento di prono-supinazione dell'avambraccio, al tester è richiesto di estendere le dita delle mani, come mostrato in figura 7.10.



Figura 7.11 Prono- supinazione dell'avambraccio combinata al movimento di estensione delle dita della mano.

Per ogni prova dinamica acquisita si procede con la ricostruzione del modello e con la successiva assegnazione dei nomi ai markers mediante la pipeline “*Reconstruct and Label*”.

Nella sezione Quality Tab si osserva la qualità della prova registrata in termini di:

- **LABELING DEI MARKERS**: il testo contenuto in ogni rettangolo indica numero dei marcatori a cui non è stato associato il nome, il numero dei gaps totali e la percentuale dei marker correttamente etichettati. Come indicatore rapido, per consentire di valutare se continuare a lavorare con lo studio, esiste un codice colore:
 - verde**: indica che il processo di assegnazione dei nomi ai markers è andato a buon fine;
 - rosso**: indica che si sono verificati dei problemi durante il processo di etichettatura;
 - giallo**: indica la presenza di problematiche accettabili per il processamento della prova.
- **TRAJECTORIES**: passando il mouse su ogni cerchio, vengono visualizzate le informazioni sulla traiettoria.

→ **TRIAL INFORMATION**: cliccando su ogni cerchio per selezionarlo, le informazioni sulla traiettoria vengono visualizzate nella colonna Selezione a destra.

Se non è selezionato alcun cerchio, vengono visualizzate le informazioni generali sulla prova attualmente caricata (nome del soggetto, modello usato, frequenza di acquisizione della prova, numero di frames totali e durata della prova).

→ **OPTIONS**: consente di configurare le opzioni di visualizzazione per la scheda Quality dei dati. In alternativa, è possibile aprire la finestra di dialogo Options (F7) e modificare le proprietà come richiesto.



Figura 7.12 Quality Tab della prova

Prima di procedere con il riempimento dei gaps, si eliminano le zone che contengono un elevato numero di markers non etichettati mediante l'opzione "Zoom to Region of Interest" oppure "Set Region of Interest", operazioni che permettono di evidenziare solo la parte di trial con il modello ricostruito che può contenere ancora alcuni gaps.

A questo punto per riempire i rimanenti gaps è possibile procedere mediante quattro differenti modi:

1. **SPLINE FILL**: questo metodo di riempimento dei gaps contenuti nelle traiettorie dei markers è applicato solo se la grandezza dei gaps è inferiore o uguale ai 100 frames e se la traiettoria è lineare.

Esso ricostruisce la traiettoria dei markers persi durante la prova dinamica mediante un processo di ottimizzazione durante cui sono interpolati i dati del marker precedente e seguente al gap selezionato.

La ricostruzione della traiettoria è visibile dal grafico contenuto nella 3D Perspective precedentemente impostato mediante i comandi contenuti nella voce window.

(Window→Option→ Data Correction View Option→ View Type: On)

2. **PATTERN FILL:** usa la traiettoria priva di gaps di un marker per ricostruire la traiettoria del marcatore mancante. Questo metodo viene utilizzato solo se è presente un marker che possiede una traiettoria simile a quella di cui si desidera ricostruire. Questo è il caso di traiettorie si originano da marker attaccati al medesimo segmento.

Dal grafico è possibile osservare due diversi tipi di traiettorie:

- *Dot Line* che rappresenta la traiettoria *predetta* dei marcatori mancati;
- *Continous Line* che rappresenta la traiettoria del marker sorgente.

3. **RIGID BODY FILL:** questo metodo di ricostruzione della traiettoria è applicato nel caso in cui il marcatore perso appartenga ad un cluster rigido formato da almeno tre markers.

Nel ricostruire la traiettoria il *Rigid Body Fill* sfrutta il vincolo di rigidità per riempire i gaps usando come fonte le traiettorie dei markers rimanenti appartenenti al corpo rigido. Questa modalità può essere usata per ricostruire ad esempio le traiettorie dei markers appartenenti al segmento torace e al segmento avambraccio.

4. **KINEMATIC FILL:** sfrutta la cinematica del segmento a cui appartiene il marker per ricavare la traiettoria del marcatore mancante. Per utilizzare questo metodo di riempimento dei gaps è necessario aver precedentemente effettuato il processo di Kinematic Fit, processo durante il quale gli angoli dei giunti del modello sono adattati così da definire una relazione tra i segmenti.

Sia il processo di riempimento dei gaps di tipo Rigid Body Fill che quello di tipo Kinematic Fill può essere effettuato lanciando apposite pipeline nella sezione *Tools* di Nexus e andando a selezionare manualmente nella sezione *trajectories*, dopo aver disattivato l'opzione *macro*, i markers che

appartengono al cluster del corpo rigido di cui si vuole oppure selezionando il segmento mancante in quanto contenente i gaps come mostrato in *figura 6.31*

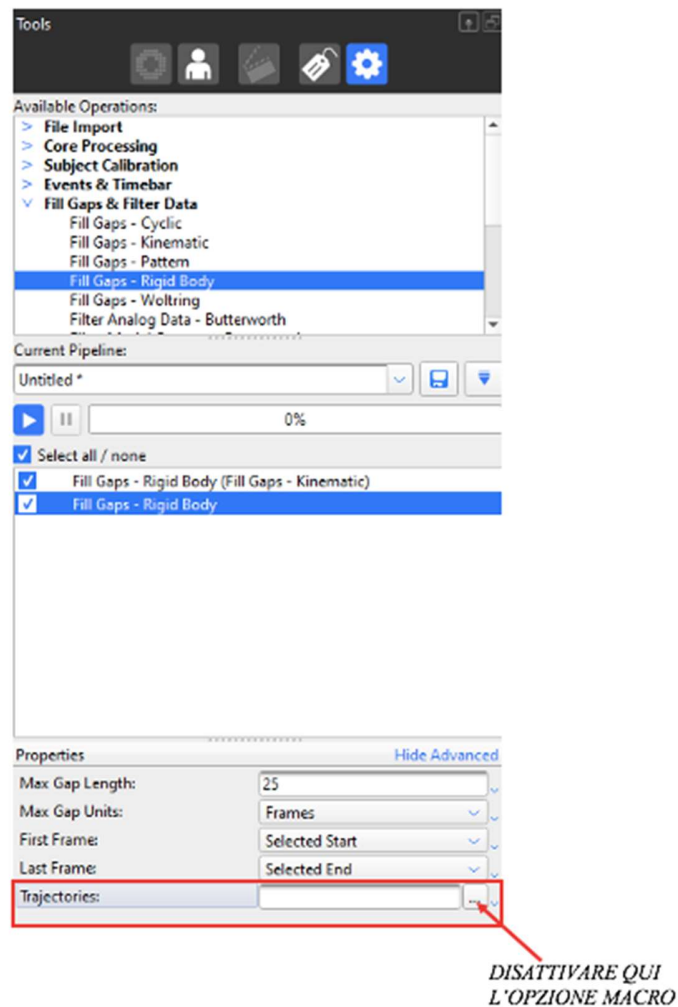


Figura 7.13 Fill Gap effettuato attraverso apposita pipeline

7.3 Analisi dei risultati

Il software Vicon Nexus, Vicon Procalc e la routine Matlab hanno consentito il processamento e l'analisi dei dati. Come già analizzato nel capitolo 6 che descrive lo sviluppo del modello, mediante il software Vicon Nexus sono stati effettuati i procedimenti di assegnazione dei nomi ai markers, la definizione dei segmenti anatomici e il riempimento di eventuali gap dovuti all'esecuzione della prova.

Successivamente l'elaborazione dei dati esportati dal sistema stereofotogrammetrico ha consentito, mediante l'uso del software Vicon Procalc, la definizione dell'orientamento dei segmenti articolari, attraverso la creazione di appositi sistemi di riferimento locali, e la definizione degli angoli articolari, che descrivono le varie relazioni tra i segmenti anatomici precedentemente definiti.

I grafici degli angoli di outputs importati in Vicon Nexus sono stati esportati in formato .c3d, come mostrato in *figura 7.14*. I file .c3d esportati da Vicon Nexus sono ulteriormente processati, dopo aver implementato un apposito codice, mediante il software Matlab R2021a in modo da visualizzare e fornire un'interpretazione fisiologica ai valori angolari ricavati. Tutti i grafici ricavati sono stati normalizzati rispetto alla posizione di partenza del soggetto così da valutare il range of motion del movimento complessivo.

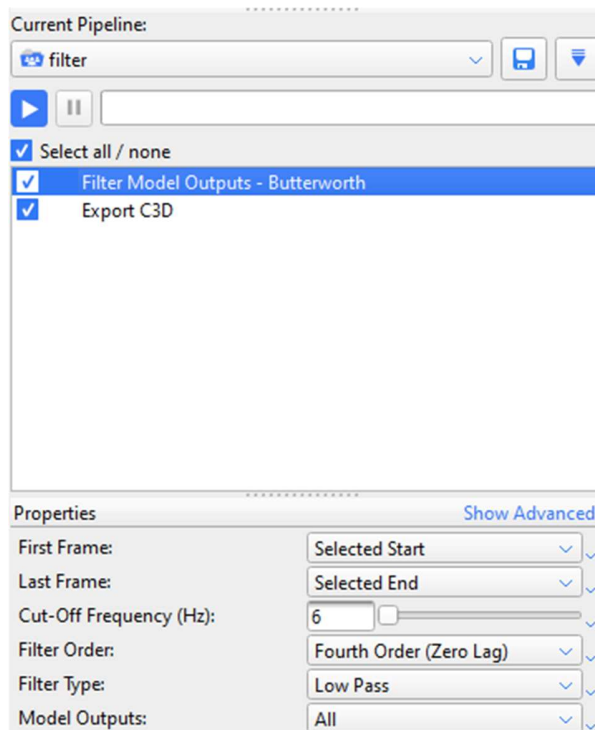


Figura 7.14 Pipeline custom made per il filtraggio e l'esportazione dei dati in Matlab

7.4 Risultati e discussioni

SOGGETTO S_1

Le prove sul soggetto S_1 sono state effettuate senza modificare il posizionamento delle telecamere presenti nel laboratorio del passo dell'Unità Spinale Unipolare; per questo motivo il processamento delle prove che prevedevano il movimento delle dita non è stato possibile.

1. ROTAZIONE DI SPALLA

Il soggetto effettua due prove di rotazione di spalla la quali differiscono dal posizionamento iniziale del braccio: durante la prima prova il soggetto presenta una extrarotazione iniziale pari a $61,7^\circ$, un'abduzione pari a 23° e una flessione di spalla di 10° mentre nella seconda prova il soggetto ha come posizione iniziale un'extrarotazione pari 24° , un'abduzione minima di $4,5^\circ$ e una flessione di spalla pari a $2,3^\circ$.

Il movimento della prova si compone a sua volta di tre steps di movimento (*figura 7.15*): la rotazione verso l'esterno, coincidente con la posizione di partenza, una posizione intermedia che prevede il gomito flesso a 90° e il braccio addotto al tronco e una rotazione interna della spalla con chiusura della mano al petto.

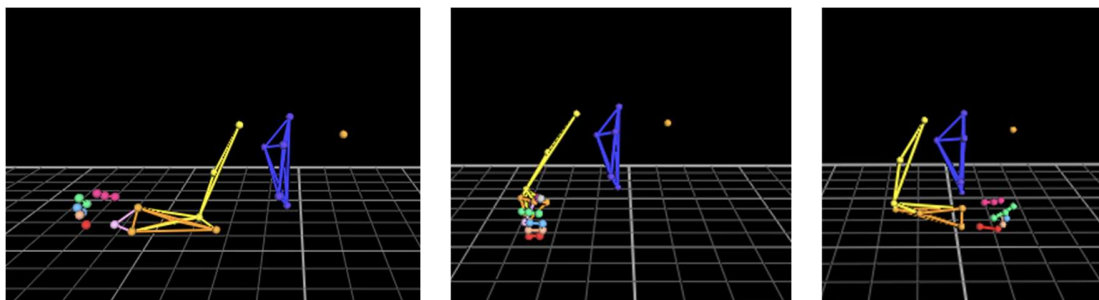


Figura 7.15 Step di movimento durante la prova di rotazione

Gli outputs della prova, calcolati come angoli di Eulero con rotazione YXZ sono l'angolo di spalla nelle sue tre componenti e quello di gomito.

Dall'analisi dei grafici è possibile osservare che, in entrambe le prove per quanto riguarda l'angolo di spalla, il movimento principale è la rotazione attorno all'asse z: esso raggiunge un valore pari a $148,5^\circ$ durante la prima prova e un valore di $107,45^\circ$ nella seconda; l'andamento dei grafici ha segno negativo in quanto per convenzione si è deciso di rappresentare negativamente il movimento di intrarotazione della spalla. In entrambe le prove i valori sono al di sotto dei valori fisiologici: una delle possibili

cause a cui imputare i risultati inferiori a quelli fisiologici è la mancata richiesta al soggetto di effettuare il movimento portando l'articolazione a fine corsa poiché si fa riferimento a movimenti usuali della vita quotidiana e non movimenti che coinvolgono tutto il range di movimento; inoltre il fatto che durante la seconda prova il braccio del soggetto sia addotto al tronco limita la possibilità di extra ruotare la spalla e perciò il valore di range of motion della prova risulta inferiore sia a quello della prova precedente che a quello fisiologico. La *figura 7.16* mostra l'andamento del range of motion della prova di rotazione della spalla.

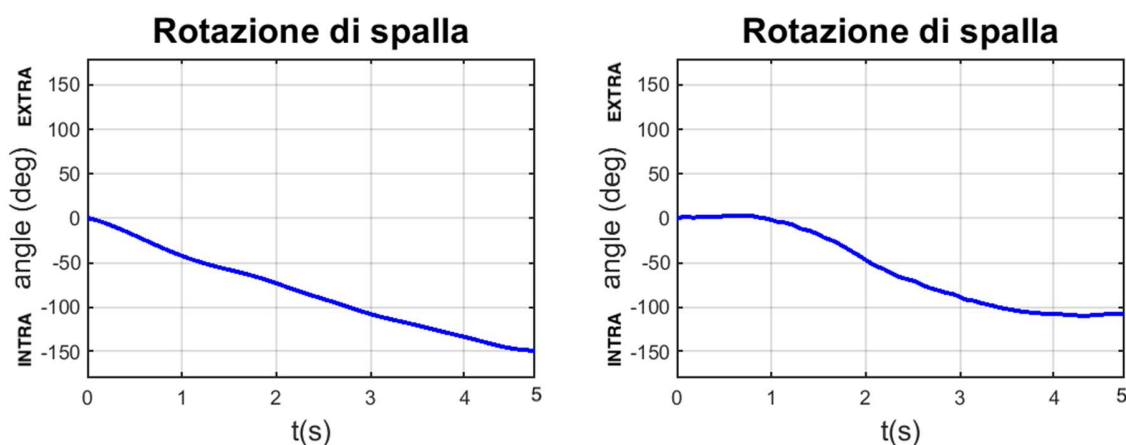


Figura 7.16 Grafico di RoM delle prove di rotazione della spalla

È stato analizzato anche il movimento della spalla lungo l'asse antero-posteriore e lungo l'asse trasversale durante le due prove. Dai grafici si osserva che durante la prima prova il soggetto passando dalla posizione iniziale alla posizione intermedia effettua una abduzione, che per convenzione ha segno negativo, di circa 7° allontanando ulteriormente il braccio dal piano sagittale, e durante la seconda rotazione, che consente alla mano di chiudersi sul petto, la spalla avvicina il braccio al piano sagittale effettuando una adduzione, che per convenzione è espressa positivamente, di altrettanti 7° . Durante la seconda prova, invece, il range di movimento di abd-adduzione è circa nullo in quanto il soggetto per tutta la prova mantiene il braccio addotto al tronco.

Per quanto riguarda l'andamento del grafico che rappresenta il movimento della spalla lungo l'asse trasversale si osserva che il soggetto in entrambe le prove effettua una flessione di spalla pari a 30° durante la prima prova e pari a 15° durante la seconda prova.

Gli andamenti dei grafici sono riportati in *figura 7.17*.

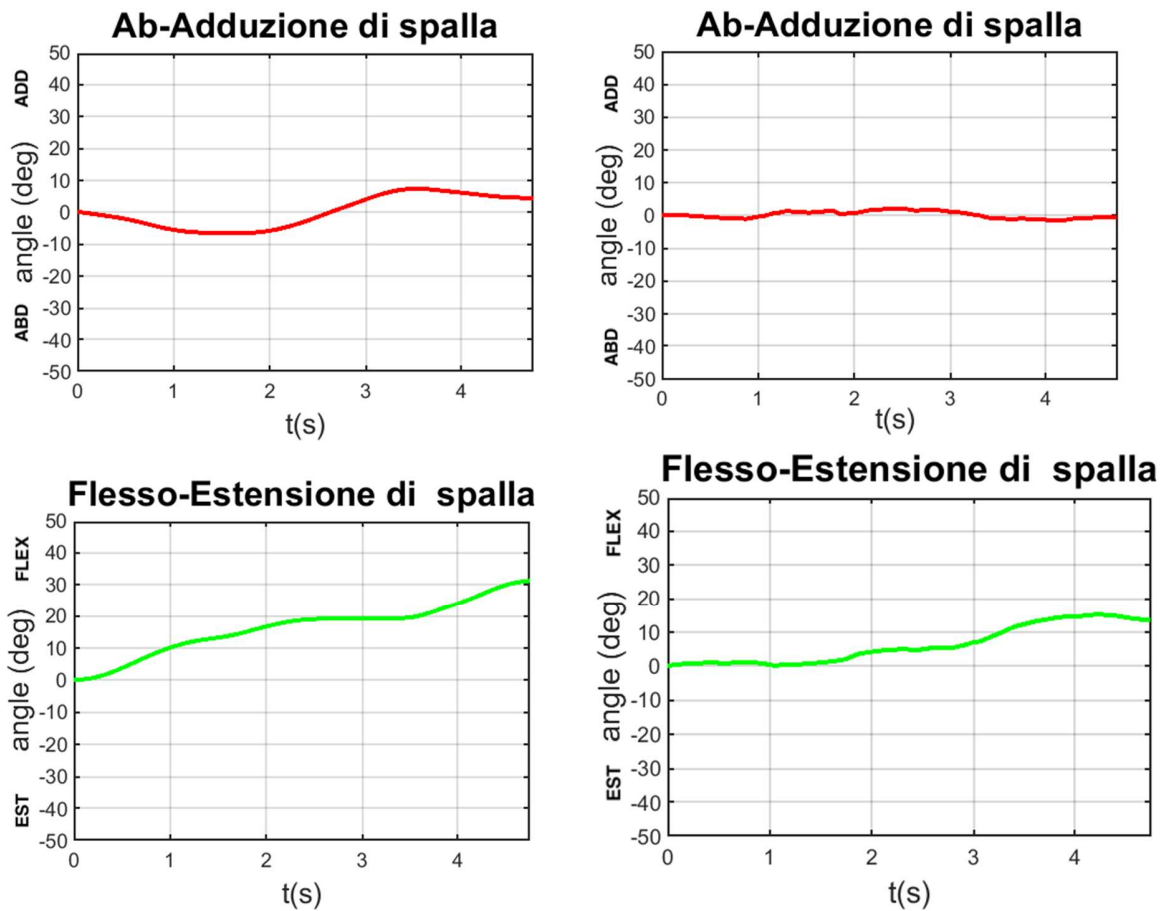


Figura 7.17 Andamento del RoM degli angoli di Abd-adduzione e Flesso-estensione di spalla durante le due prove di rotazione di spalla

Le prove di rotazione di spalla sono effettuate con il gomito flesso; per questo motivo si è deciso di verificare che il modello calcolasse correttamente il RoM della flessione di gomito fisiologicamente pari a 90° .

Come si osserva dai grafici la curva che rappresenta la flessione del gomito oscilla tra valori compresi tra 66° e 102° durante la prima prova mentre è più stabile durante la seconda assumendo valori compresi tra gli $83,72^\circ$ e i 93° come mostrato in figura 7.18.

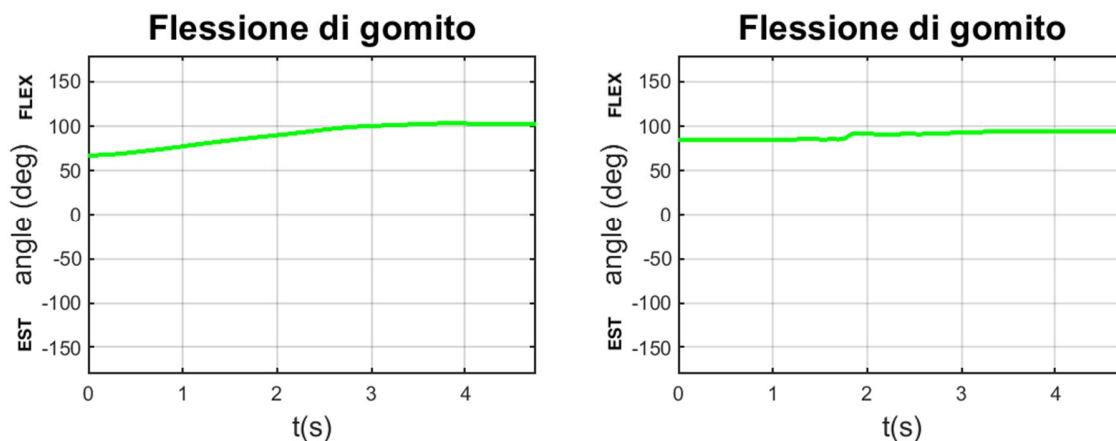


Figura 7.18 Andamento dell'angolo di gomito durante la prova di rotazione di spalla

Durante la prima prova di rotazione il soggetto presenta una posizione di partenza più naturale disponendo di una maggiore libertà di movimento lungo i tre piani anatomici come dimostrano i grafici di abd-adduzione e flesso-estensione della spalla. Inoltre si osserva anche una coordinazione di gomito che rende la prova meno selettiva. La seconda prova, invece, risulta più selettiva in quanto consente di analizzare l'attivazione dei muscoli dell'articolazione di spalla che permettono la intra- extrarotazione; in ogni caso la prova non permette di visualizzare esclusivamente il grado di libertà dovuto alla rotazione in quanto, come si osserva dal grafico di flesso-estensione di spalla, durante la prova il soggetto effettua una flessione di spalla.

L'analisi di queste due prove di rotazione può essere utile al terapeuta per capire come far effettuare il movimento al paziente durante la fase riabilitativa: la prima essendo una prova più complessa e naturale può essere effettuata con l'intento di riprodurre un gesto più vicino alla quotidianità mentre la seconda, più selettiva, può essere usata dal terapeuta se si desidera riprodurre l'attivazione di determinate strutture o complessi corporei.

Come descritto nel capitolo task di movimenti sono state effettuate delle prove per valutare il movimento di flesso-estensione del soggetto; in particolare sono state eseguite quattro prove di estensione in modalità anti gravità, pro gravità, su un piano neutro e pro gravità con estensione limitata dalla presenza di un tavolino e una prova che valutasse contemporaneamente sia la flessione che l'estensione. (figura 7.19)

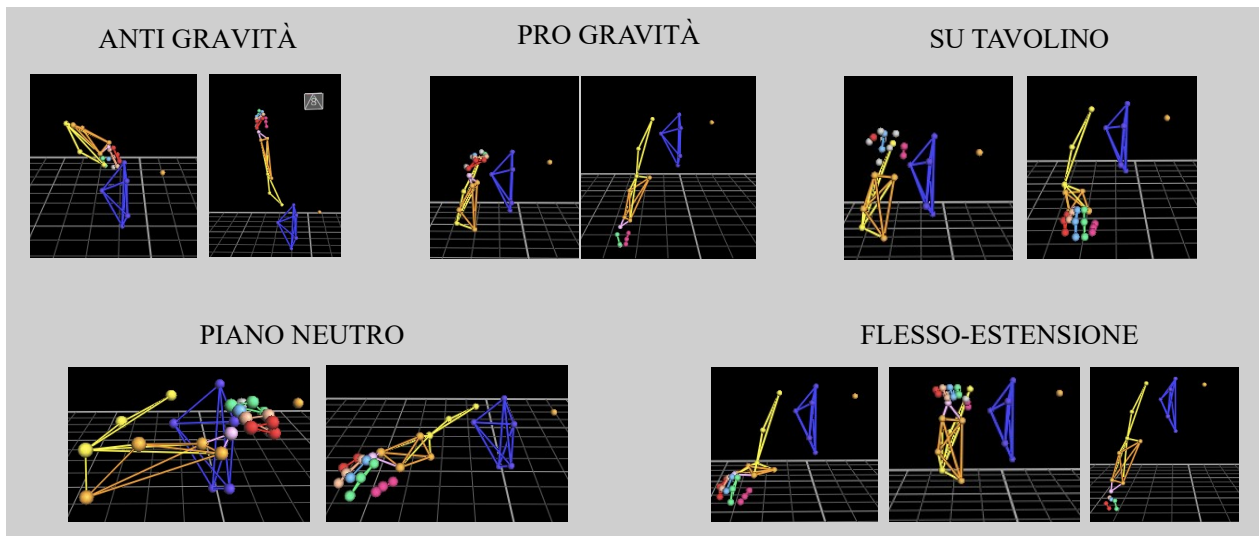


Figura 7.19 Prove di estensione e di flessio-estensione effettuate

2. PROVE DI ESTENSIONE

Durante le prove di estensione il soggetto ha come posizione di partenza il gomito totalmente flesso (flessione anti gravità pari a $158,9^\circ$, flessione pro gravità pari a $152,4^\circ$, flessione piano neutro $146,45^\circ$ e flessione tavolino 91°); al soggetto è stato richiesto di effettuare un'estensione completa che per convenzione viene assunta negativa. Dai grafici ottenuti si osserva che l'andamento della curva di estensione anti gravità e pro gravità rispecchiano il valore di range di movimento atteso ($146,5^\circ$ e $144,4^\circ$) mentre la prove di estensione effettuata sul piano neutro e quella effettuata sul tavolino sono leggermente inferiori ($138,7^\circ$ e $76,5^\circ$) ai valori fisiologici presenti in letteratura pari a 145° per l'estensione totale e a 90° per l'estensione su tavolino. Anche in questo caso, come avviene durante le prove di rotazione della spalla, valori al di sotto dei range fisiologici sono da imputare a una mancata decisione di testare il range di movimento massimo; inoltre per quanto riguarda la prova di estensione su tavolino i valori sono influenzati dalla tipologia e dall'inclinazione del tavolino su cui è stata effettuata la prova.

Di seguito, si riportano i grafici di estensione di gomito di tutte e quattro le prove (figura 7.20).

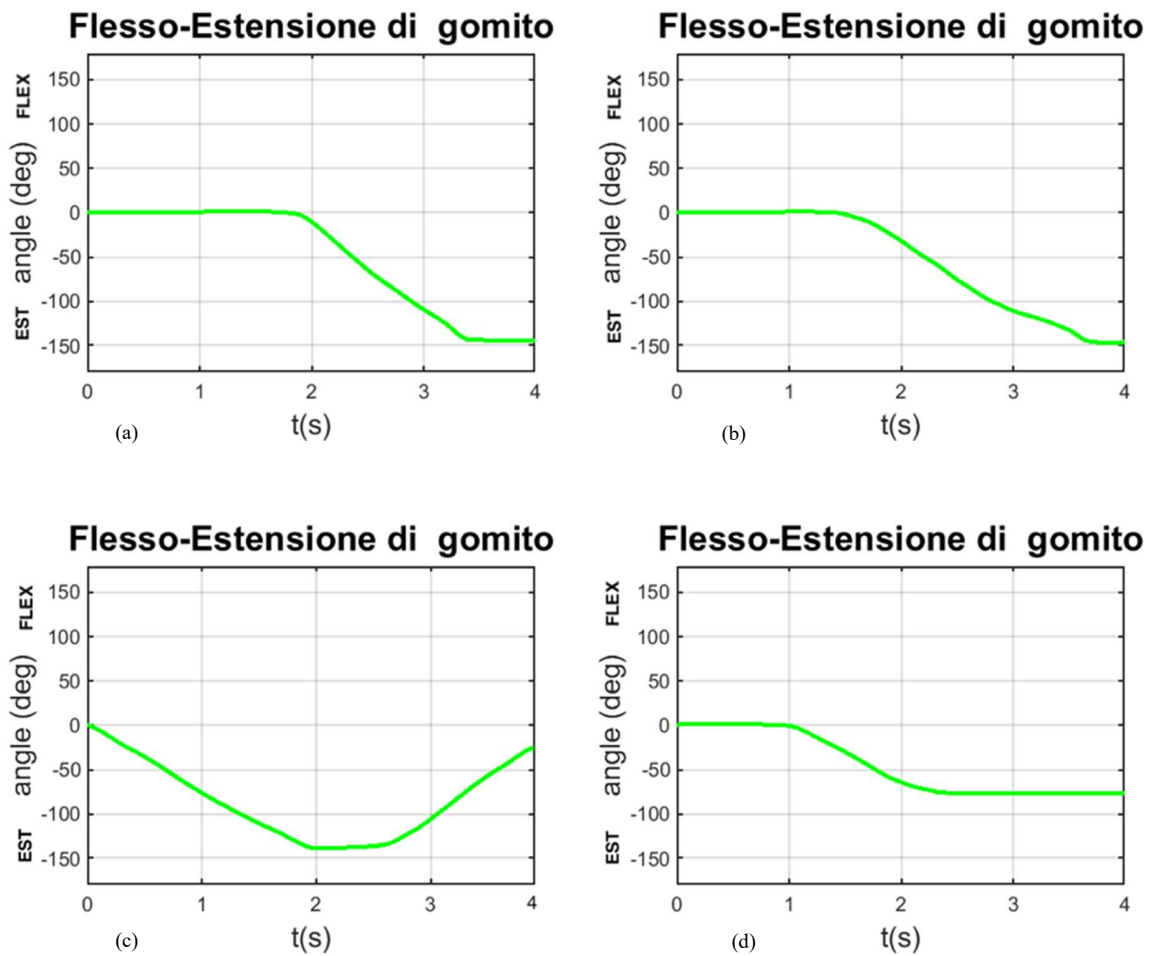


Figura 7.20 (a) estensione anti gravità, (b) estensione pro gravità, (c) estensione su piano neutro, (d) estensione su tavolino

Oltre al comportamento del gomito durante la prova si è studiato anche l’andamento della spalla nei tre piano di interesse. Il soggetto a inizio prova presentava delle componenti di abd-adduzione, flesso-estensione e rotazione di spalla come riportato nella tabella sottostante (*tabella 17*).

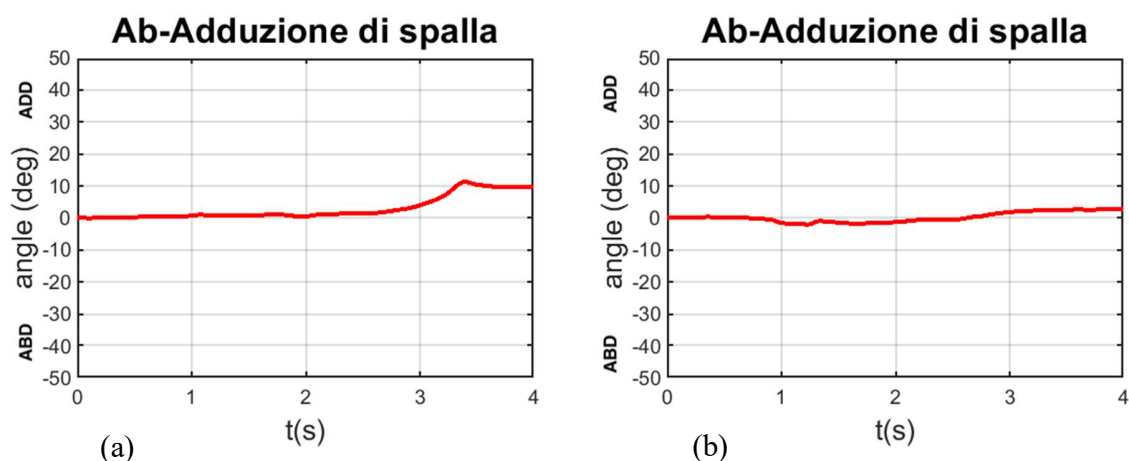
SOGGETTO S ₁	ABD-ADDUZIONE	FLESSO-ESTENSIONE	ROTAZIONE
ANTI-GRAVITÀ	ABD:30°	FLEX:150,62	INTRA:58,4°
PRO-GRAVITÀ	ABD:11,8°	FLEX:8,9°	INTRA:6,2°
NEUTRO	ABD:35,3°	FLEX: 78,5°	INTRA:82,9°
TAVOLINO	ABD:10,8°	FLEX:1,33°	INTRA:6,4°

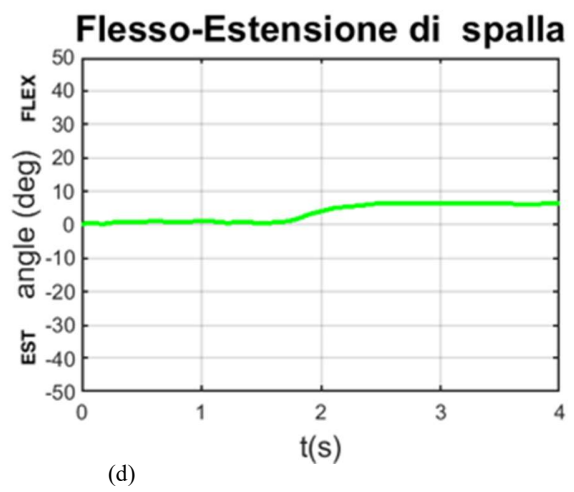
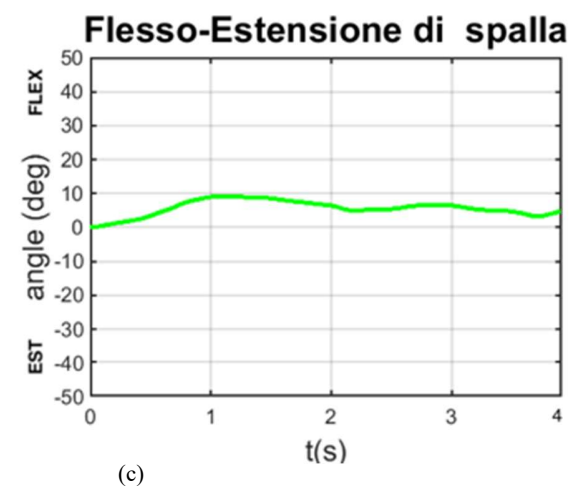
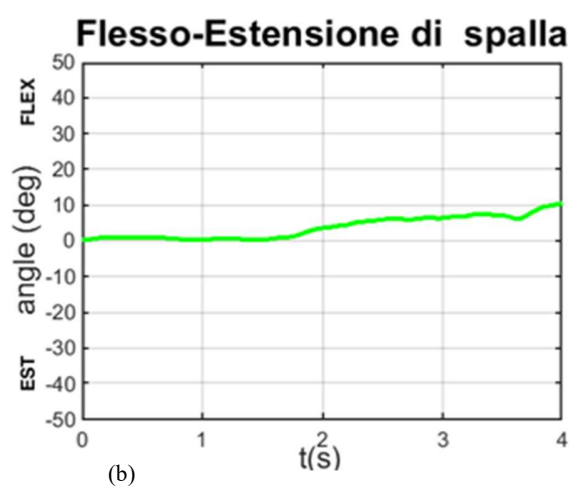
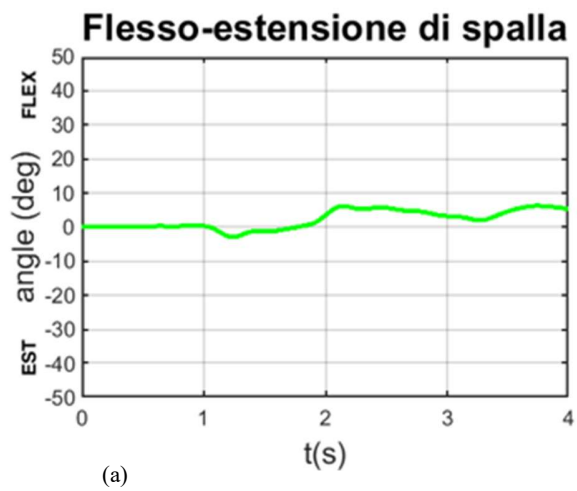
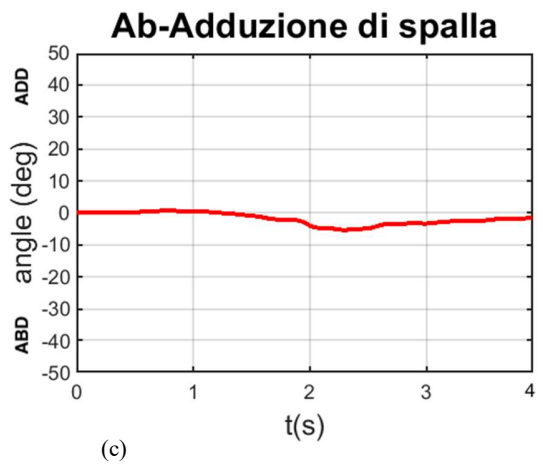
Tabella 17 Componenti di spalla durante la prova di flesso-estensione di gomito

Per quanto riguarda il movimento di abd-adduzione della spalla esso è particolarmente rilevante sia durante il movimento di estensione anti gravità, in quanto il soggetto durante l'estensione totale effettua un movimento di adduzione della spalla di circa 10° , sia durante il movimento di estensione su piano neutro: il soggetto passando dalla posizione iniziale di gomito flesso a quella finale di gomito esteso effettua una abduzione pari a 7° che al termine della prova si stabilizza intorno al valore di 5° . Nelle prove di estensione anti gravità e su piano neutro il soggetto già nella posizione di partenza presenta valori considerevoli di abduzione di spalla; per quanto riguarda le altre prove si osserva che il soggetto non modifica il valore iniziale.

Durante tutte le prove il soggetto, anche se parte da valori di flessione iniziale diversi, effettua un movimento di flessione di spalla contenuto nel range di 10° ; la rotazione di spalla è presente in ogni prova. In particolare si osserva che nell'estensione anti gravità il soggetto effettua un'extrarotazione di circa 20° e un'intrarotazione di spalla al termine dell'estensione; durante l'estensione pro gravità il soggetto passando dalla posizione di gomito flesso alla posizione di gomito esteso effettua una intrarotazione di spalla di circa 10° per poi tornare al valore iniziale al termine dell'estensione; nell'estensione su piano neutro il soggetto effettua durante i primi secondi della prova una extrarotazione di spalla pari $16,8^\circ$ che poi diminuisce e si arresta al valore nullo al termine della prova mentre durante l'estensione su tavolino il soggetto, passando dalla posizione iniziale a quella finale, extrarota la spalla di circa $23,5^\circ$. La presenza di valori significativi di angoli di rotazione durante la prova di estensione su piano neutro e su tavolino spiega la riduzione del range of motion riportata nel grafico di estensione di gomito.

La variazione del range of motion della spalla durante le prove di estensione sono mostrate in figura 7.21.





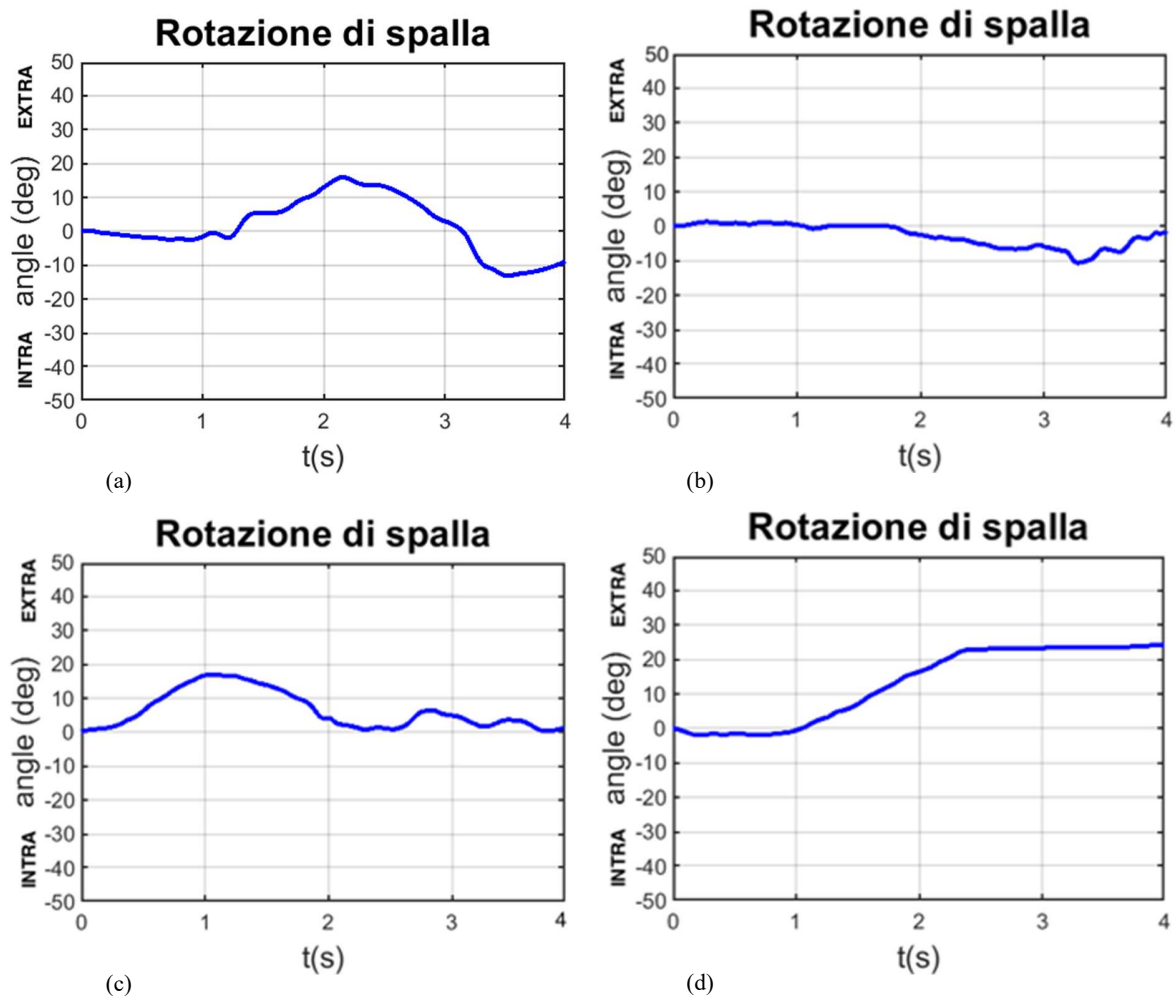


Figura 7.21 Andamento angolo della spalla lungo l'asse antero-posteriore, lungo l'asse trasversale e attorno all'asse verticale : (a) estensione anti gravità, (b) estensione pro gravità, (c) estensione piano neutro, (d) estensione su tavolino

Tra le prove effettuate si osserva che il movimento con minor contributo sugli altripiani risulta essere l'estensione pro gravità.

3. PROVA DI FLESSO ESTENSIONE PRO GRAVITÀ

Al soggetto è stato richiesto di effettuare anche una prova di flesso estensione pro gravità che si compone dei seguenti step di movimento: il soggetto presenta come posizione iniziale una flessione di gomito pari a $91,08^\circ$ contemporaneamente ad una abduzione di spalla pari a $10,8^\circ$, ad una flessione di spalla di $1,32^\circ$ e a una intrarotazione iniziale pari a $6,3^\circ$, successivamente effettua una seconda flessione così da raggiungere il valore della flessione totale ed infine un'estensione totale. Il range di

movimento complessivo di flesso estensione è pari a $144,7^\circ$ valore congruente al range fisiologico della prova.

Anche in questo caso, come nelle prove precedenti, si è analizzato il comportamento della spalla lungo i tre assi di interesse: il range of motion del movimento di abd-adduzione della prova è circa nullo in quanto il soggetto durante la prova mantiene il braccio addotto al tronco mentre il movimento di flessione della spalla raggiunge il valore di $5,3^\circ$ durante la flessione di gomito per poi diminuire e arrestarsi al valore di $3,7^\circ$ al termine dell'estensione.

Per quanto riguarda il movimento di rotazione della spalla, il soggetto durante la fase di flessione totale del gomito intra ruota la spalla di circa 18° per poi effettuare un'extrarotazione di circa 8° durante la fase di estensione totale.

Gli andamenti degli angoli di gomito e di spalla sopra descritti sono riportati in *figura 7.22*

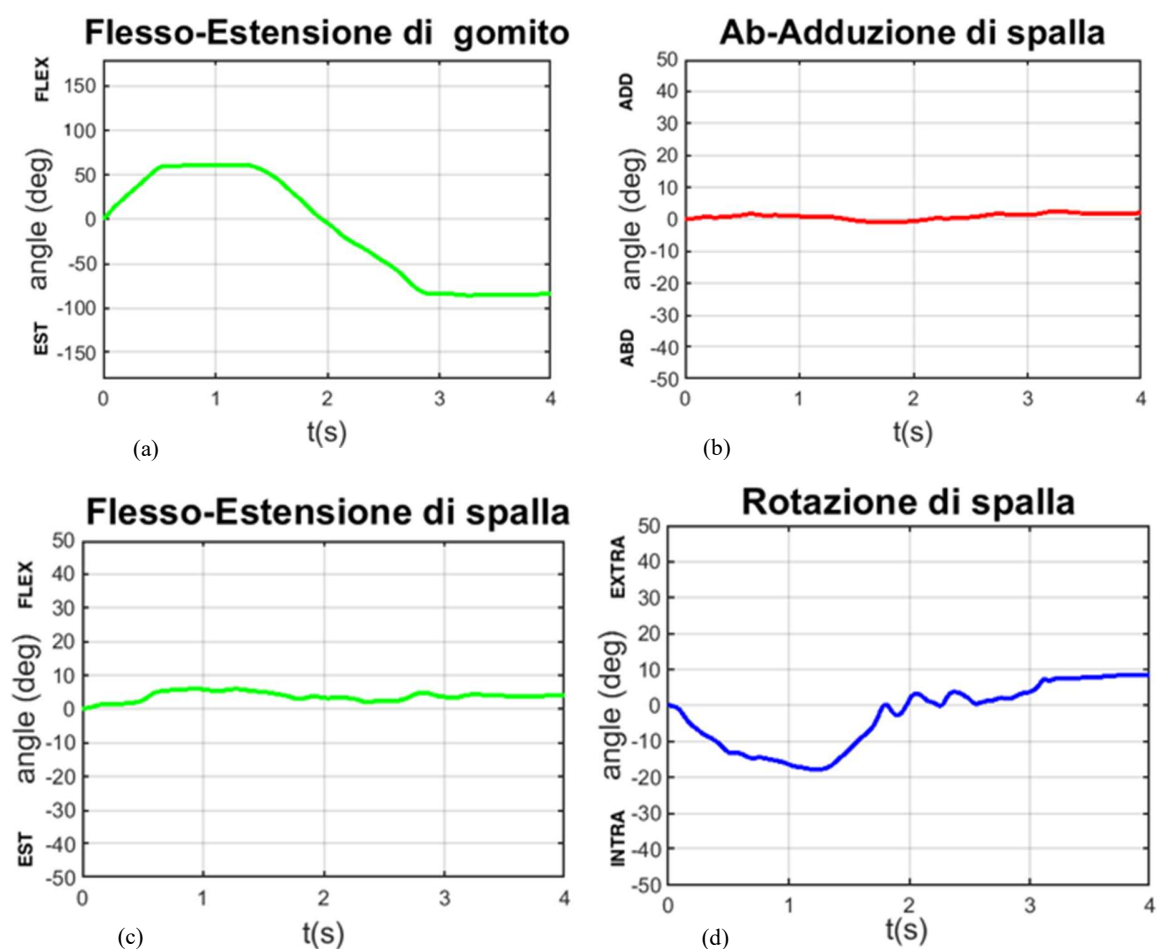


Figura 7.22 Andamento degli angoli di gomito e di spalla durante la prova di flesso-estensione pro gravità: (a) angolo di gomito, (b) angolo di spalla lungo l'asse antero-posteriore, (c) angolo spalla lungo l'asse trasversale, (d) angolo di spalla

lungo l'asse verticale

4. ROTAZIONE DI SPALLA COMBINATA ALLA ESTENSIONE DI GOMITO

Durante la seguente prova è stato richiesto al soggetto di effettuare una extrarotazione di spalla contemporaneamente alla estensione di gomito come mostrato in figura 7.23

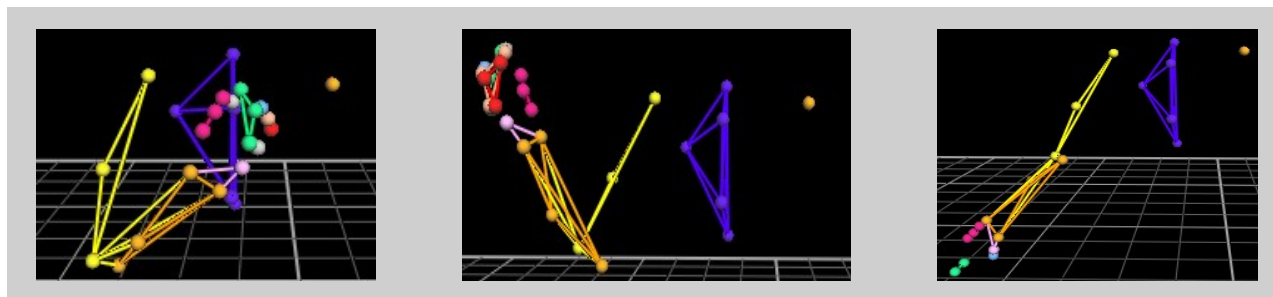


Figura 7.23 Step di movimento della prova combinata

Assumendo come posizione di riferimento la posizione di partenza, ossia il soggetto con gomito totalmente flesso (140°) e con la spalla intra ruotata di $67,7^\circ$, abdotta $14,2^\circ$ e flessa di $18,2^\circ$, si sono calcolati gli outputs dopo aver normalizzato rispetto alla posizione di partenza così da poter valutare il range di movimento dell'articolazione.

Per quanto riguarda l'extrarotazione di spalla, assunta per convenzione positiva, si osserva che il RoM è di circa $122,8^\circ$ e si compone di due steps: il primo prevede un'extrarotazione di spalla con gomito flesso; la seconda prevede un'ulteriore extrarotazione di spalla contemporanea all'estensione di gomito. Contemporaneamente all'extrarotazione di spalla al soggetto è chiesto di effettuare il movimento di estensione di gomito ottenendo un range di movimento pari a 132° . L'andamento del movimento dell'extrarotazione e della flesso-estensione di gomito è mostrato in figura 7.24.

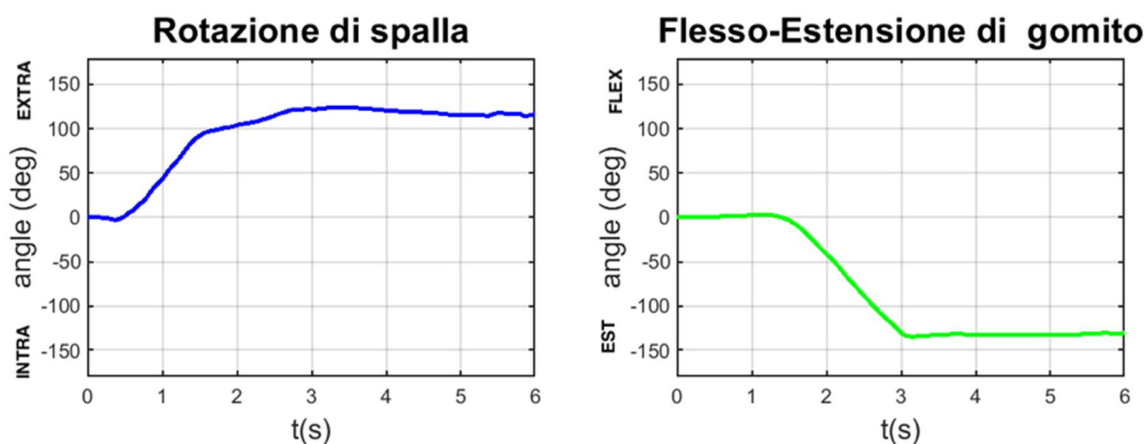


Figura 7.24 RoM della flesso-estensione di spalla durante il movimento combinato extrarotazione- estensione gomito

Il fatto che entrambe le prove abbiano raggiunto valori al di sotto dei valori fisiologici trovati in letteratura è dovuto al fatto che al soggetto è richiesto di effettuare contemporaneamente due prove per cui non si testerà il valore massimo del movimento.

Si è osservato anche il comportamento della spalla lungo l'asse antero- posteriore e trasversale. Dall'analisi dei grafici si osserva che il soggetto durante il movimento di extrarotazione allontana il braccio dal piano sagittale del corpo effettuando un'abduzione di circa 14° che si riduce durante la fase di estensione assestandosi attorno al valore di $12,5^\circ$; analogamente durante la fase di extrarotazione la spalla si flette di circa $5,8^\circ$, valore che si riduce durante la fase di estensione interrompendosi attorno al valore di $2,9^\circ$.

Gli andamenti della spalla lungo l'asse antero- posteriore e lungo quello trasversale sono osservabili nella figura 7.25.

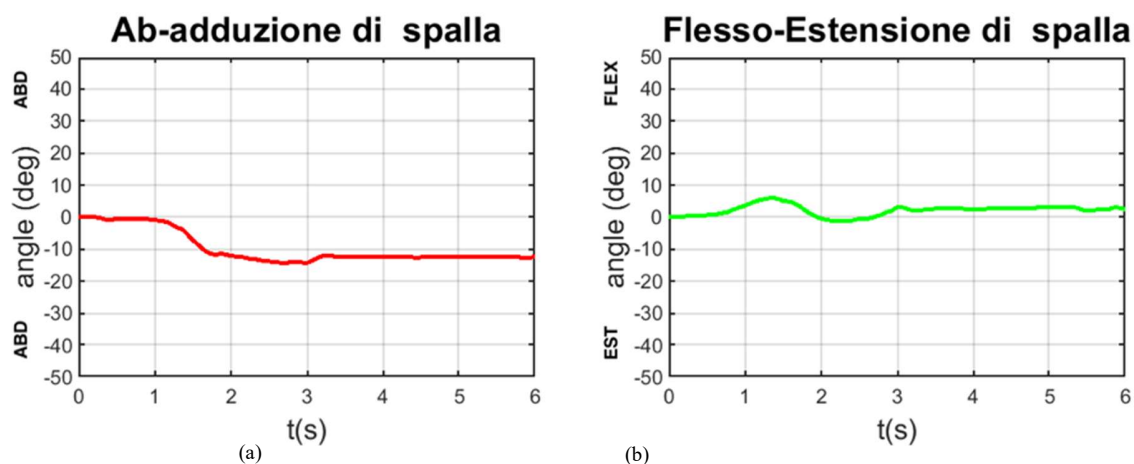


Figura 7.25 Angolo di spalla durante la prova combinata di extrarotazione ed estensione del gomito pro gravità: (a)angolo di spalla lungo l'asse antero-posteriore, (b) angolo di spalla lungo l'asse trasversale

La valutazione della seguente prova è di particolare interesse in ambito clinico in quanto mediante la prova di flesso-estensione di gomito combinata all'extrarotazione di spalla è possibile valutare l'eventuale recupero del paziente dopo che ha subito l'intervento di nerve transfer che prevede il trasferimento del nervo del ramo motorio del piccolo rotondo al nervo motorio della testa lunga del tricipite.

5. SUPINAZIONE

Durante la prova di supinazione il soggetto parte con l'avambraccio pronato e con il polso ruotato di $21,8^\circ$, addotto di 5° e flesso di 30° .

Il grafico ottenuto segue esattamente l'andamento del movimento di prono-supinazione: l'angolo di rotazione del polso è nullo a inizio prova in seguito alla normalizzazione effettuata rispetto alla posizione iniziale del soggetto, il valore dell'angolo al polso diminuisce fino a raggiungere il picco di $141,8^\circ$ in corrispondenza del movimento di supinazione dell'avambraccio per poi aumentare e tornare al valore nullo in corrispondenza del movimento di pronazione.

Il valore di range di movimento della prova risulta essere di poco inferiore ai valori trovati in letteratura pari a 170° dal momento che durante la prova il soggetto effettua anche un movimento di flessione di circa 40° e un'abduzione di $53,5^\circ$ di polso; la prova è ritenuta in ogni caso accettabile e fisiologica.

Il gomito per tutta la durata della prova di supinazione permane nella posizione di partenza ossia flesso di circa 77° . Nella posizione di partenza il soggetto presenta una flessione di spalla di circa 23° , un'intrarotazione di $25,5^\circ$ e una abduzione di $20,7^\circ$. Dai grafici si osserva che durante il movimento il soggetto non modifica la sua posizione di partenza.

In *figura 7.26* riporta gli step di movimento della prono-supinazione e l'andamento dell'angolo al polso durante il movimento di prono-supinazione.

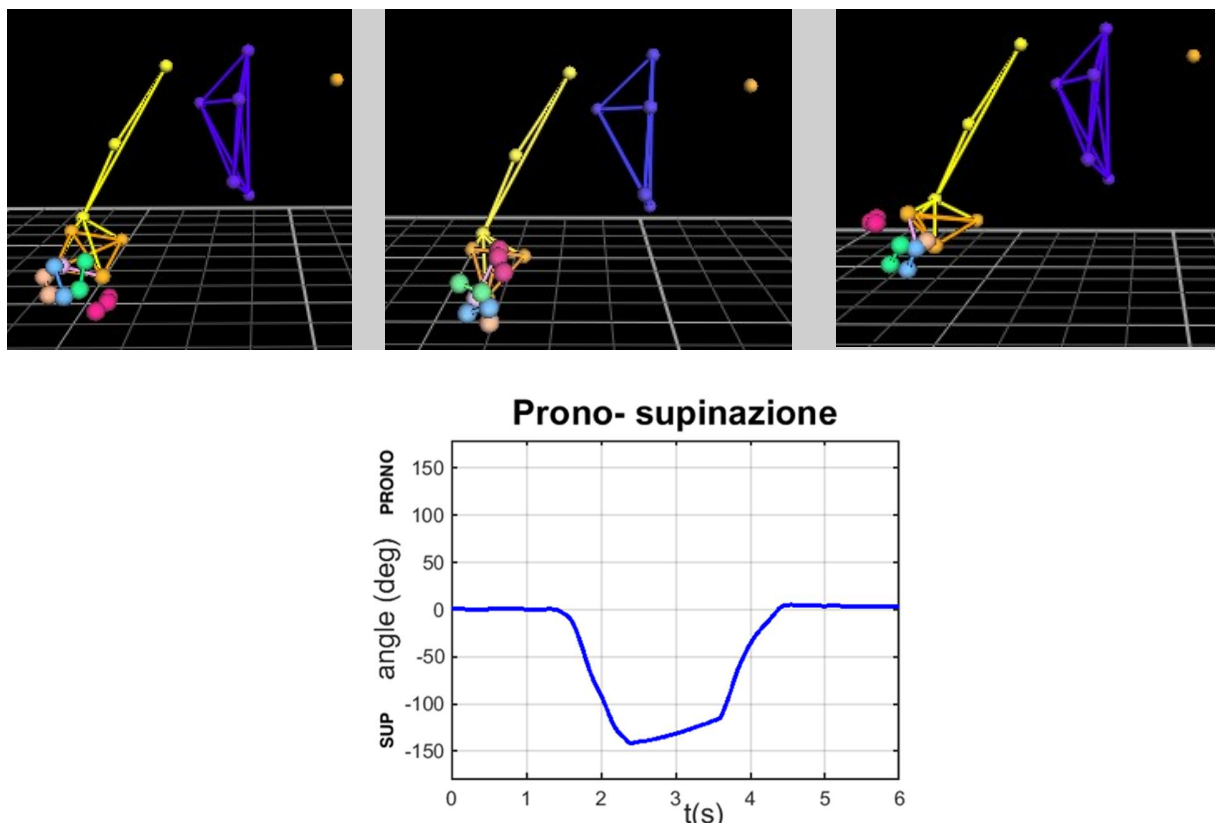


Figura 7.26 Step di movimento della prova di prono-supinazione e andamento dell'angolo al polso

Per poter valutare anche i movimenti fini delle mani, in accordo con la letteratura si è deciso di modificare il posizionamento delle telecamere del laboratorio così da restringere il volume di cattura.

Due delle otto telecamere a infrarosso del laboratorio sono state spostate e posizionate su treppiedi lateralmente al soggetto come mostrato in *figura 7.26*.

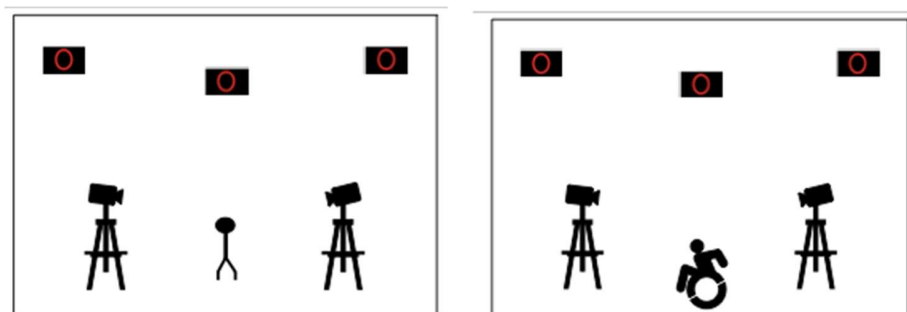


Figura 7.27 Posizionamento delle telecamere per le prove con il soggetto S_2 e S_3

SOGGETTO S_2 E S_3

1. PROVE DI ESTENSIONE

Sono state condotte due prove di estensione pro gravità che differivano l'una dall'altra per il posizionamento del soggetto all'interno del volume di cattura, in quanto nella prima prova il soggetto è posto centralmente alle due telecamere mentre durante la seconda prova il soggetto è posto frontalmente a una delle due telecamere IR (*figura 7.28*); la scelta di modificare la posizione del soggetto aveva come obiettivo quello di verificare in quale delle due configurazioni i markers fossero meglio visibili. Oltre alla prova di estensione pro gravità è stata effettuata anche una prova di estensione su piano neutro.



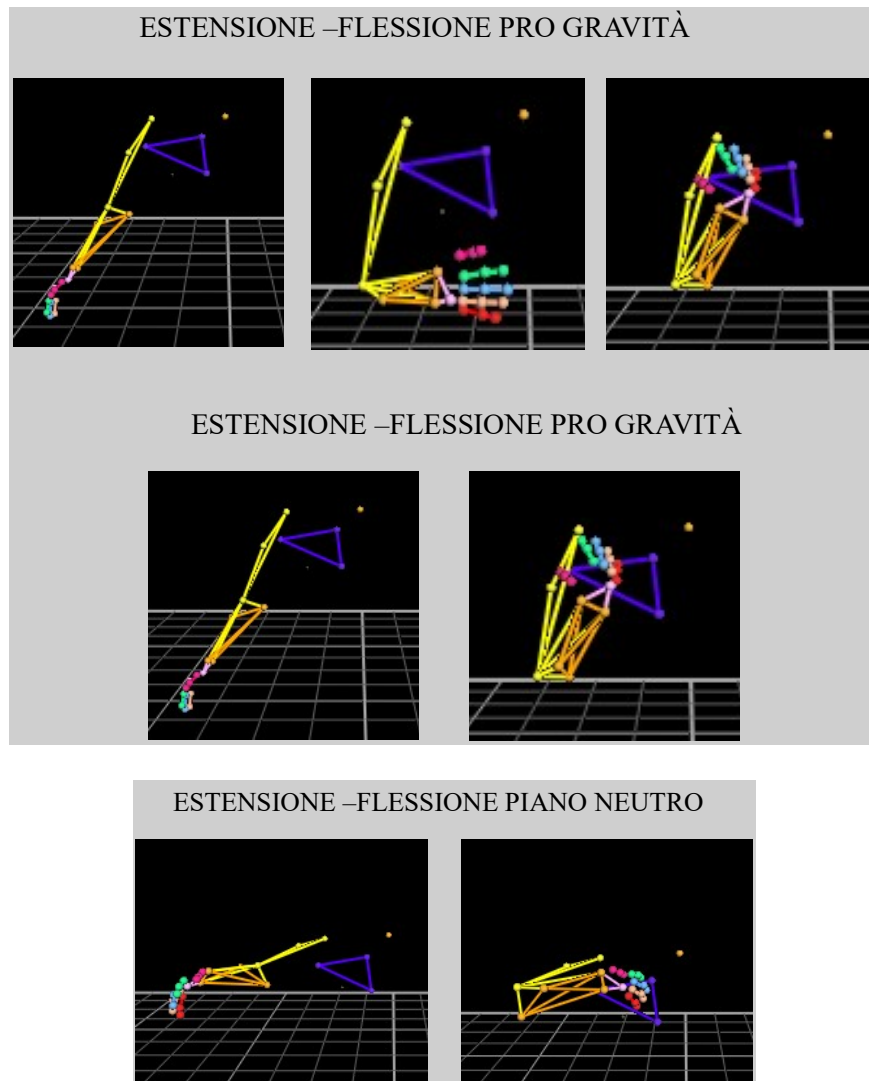


Figura 7.28 Disposizione del soggetto all'interno del volume di cattura e tipologie di prove di estensione condotte

In entrambe le prove il soggetto presentava come posizione iniziale un'estensione totale dell'arto superiore anche se è possibile osservare ancora una minima flessione di gomito di 10° durante la prima prova e di $11,8^\circ$ nella seconda.

Durante la prima prova il soggetto effettua due movimenti di estensione-flessione parziale del gomito a 90° per poi effettuare una flessione totale di gomito a fine prova. Il range complessivo di movimento è pari $127,7^\circ$. Durante la seconda prova invece il soggetto effettua due cicli di estensione -flessione totale raggiungendo un range complessivo di movimento pari a 130° .

Durante la prova di flessione su piano neutro il soggetto presenta come posizione partenza una flessione totale di gomito anche se, come nelle prove precedenti, permane una flessione di gomito pari

a 10° . Il soggetto effettua due cicli di estensione-flessione totale raggiungendo un range of motion a fine prova pari a 130° .

Come si osserva dai grafici riportati in *figura 7.29* l'andamento dei grafici è simile in tutte e tre le prove come anche i valori dei range trovati.

Da un confronto tra il movimento del secondo soggetto con il movimento del primo si osserva che il movimento del secondo soggetto è più limitato.

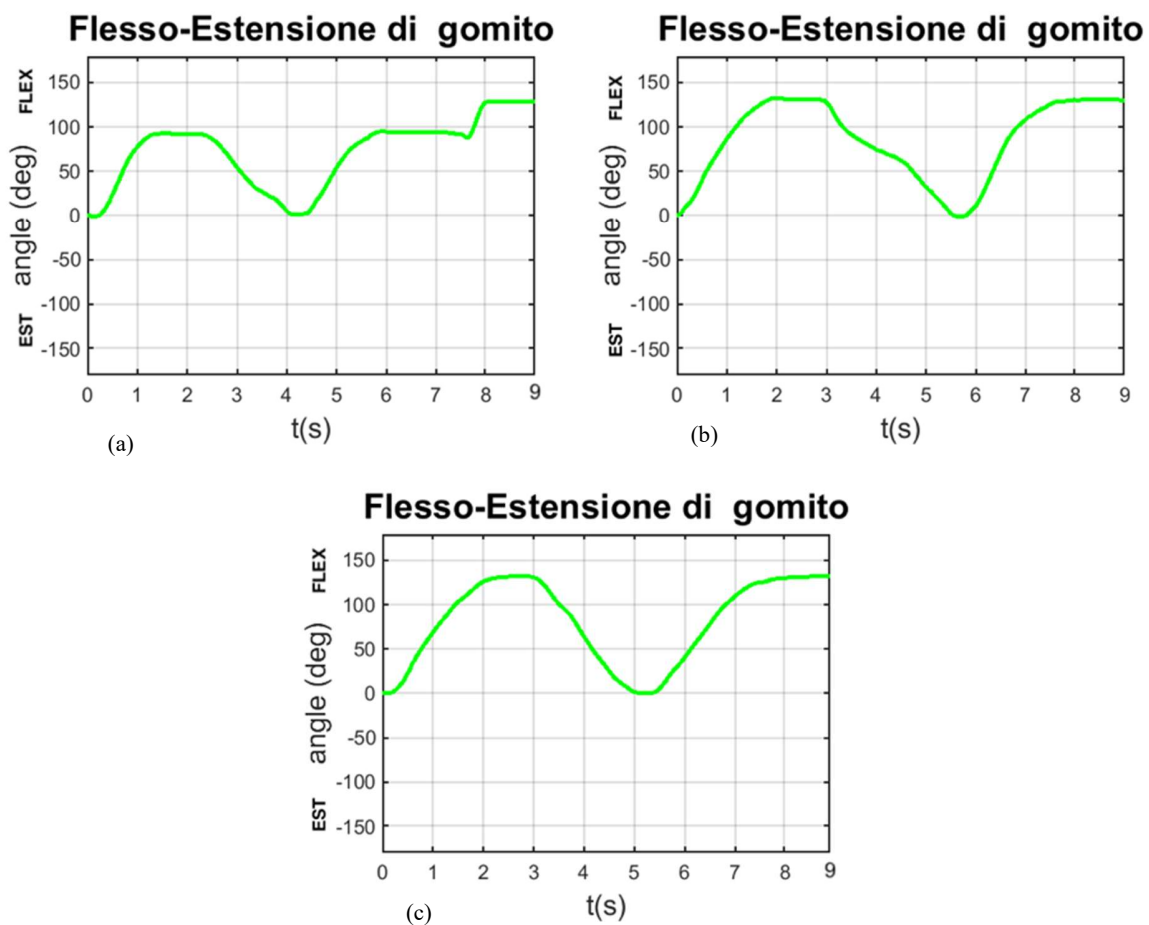


Figura 7.29 RoM della prova di flessione pro gravità (a) e (b) e su piano neutro (c)

6. PROVA DI FLESSO ESTENSIONE PRO GRAVITÀ

Come avvenuto per il soggetto S_1 anche al soggetto S_2 è stato richiesto di effettuare la prova di flesso estensione pro gravità che si compone dei seguenti step di movimento: il soggetto presenta come posizione iniziale una flessione di gomito pari a $93,44^\circ$, successivamente effettua una seconda

flessione così da raggiungere il valore della flessione totale ed infine un'estensione totale. Il range di movimento complessivo di flesso estensione è pari a $144,9^\circ$ valore pari al range fisiologico della prova. L'andamento dell'angolo di flesso-estensione gomito e di spalla è riportato in *figura 7.30*.

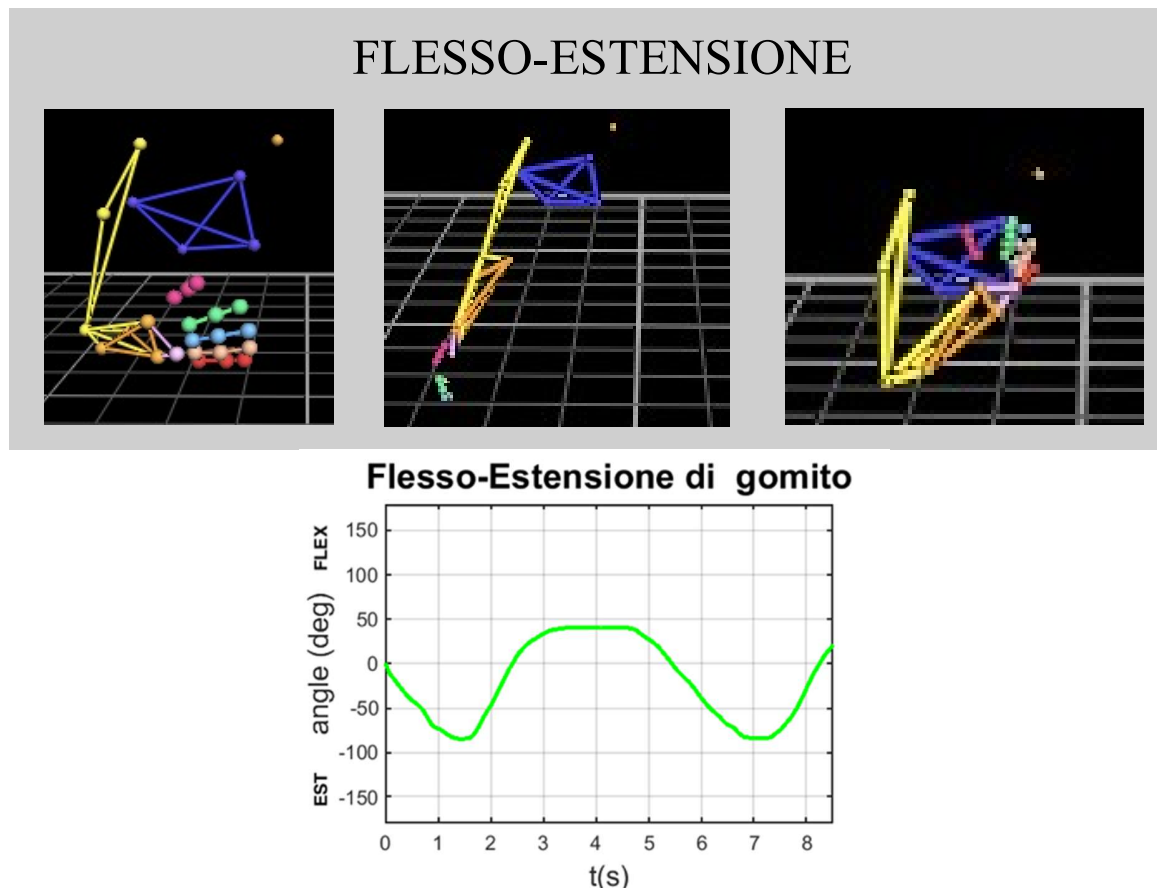


Figura 7.30 Step della prova e andamento dell'angolo di gomito durante la prova di flesso estensione

7. PRONO- SUPINAZIONE

Durante la prova di supinazione il soggetto S_2 parte con l'avambraccio pronato e con il polso ruotato di $29,6^\circ$, addotto di 11° e flesso di circa 7° .

Il grafico ottenuto segue esattamente l'andamento del movimento di prono-supinazione: l'angolo di rotazione del polso è nullo a inizio prova in seguito alla normalizzazione effettuata rispetto alla posizione iniziale del soggetto, il valore dell'angolo al polso diminuisce fino a raggiungere il picco di $125,8^\circ$ in corrispondenza del movimento di supinazione dell'avambraccio per poi aumentare e tornare al valore nullo in corrispondenza del movimento di pronazione. Il valore di range di movimento della prova risulta essere inferiore ai valori trovati in letteratura pari a 170° e anche

inferiore rispetto ai valori trovati per il soggetto S_1 ; inoltre durante la prova il soggetto modifica la flessione del gomito di circa 10° quando effettua il movimento di supinazione. A differenza del soggetto S_1 , durante la prova di prono-supinazione il soggetto S_2 non modifica l'ampiezza dell'angolo di flessione di adduzione del polso.

In *figura 7.31* riporta gli step di movimento e l'andamento dell'angolo al polso e del gomito durante il movimento di prono-supinazione.

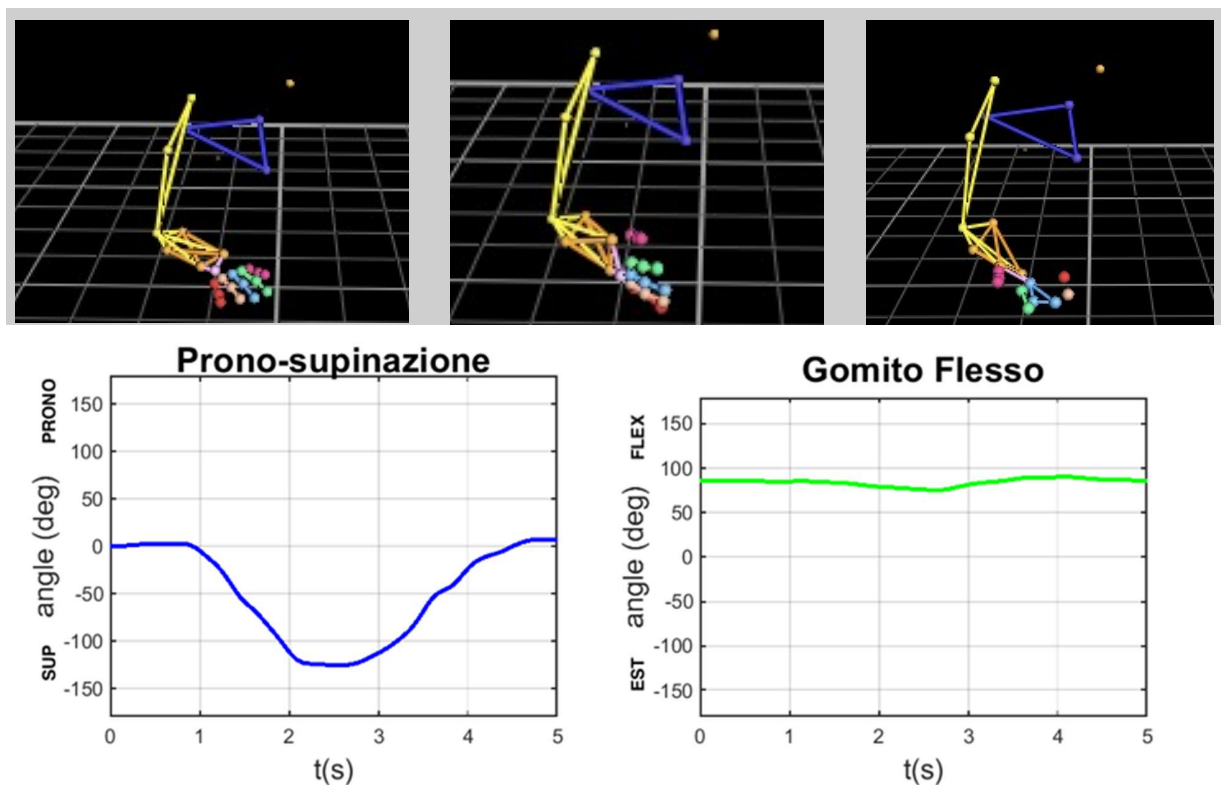


Figura 7.31 Step di movimento della prono supinazione e andamento dell'angolo di polso e di gomito durante il movimento

Il soggetto S_3 ha come posizione di partenza l'avambraccio pronato, sollevato e il gomito ruotato di 66° , abdotto di $11,4^\circ$ e flesso di circa 73° . La posizione di inizio prova è stata utilizzata per normalizzare la prova così da poter valutare il range di movimento dell'articolazione.

Il soggetto non effettua il movimento di prono-supinazione bensì un movimento di pronazione: dalla posizione iniziale di avambraccio pronato, il soggetto effettua una rotazione dell'avambraccio poco oltre la posizione di riferimento anatomica per poi tornare alla posizione iniziale.

Il grafico ottenuto segue esattamente l'andamento del movimento di pronazione: l'angolo di rotazione del gomito è nullo a inizio prova in seguito alla normalizzazione effettuata rispetto alla

posizione iniziale del soggetto, il valore dell'angolo al gomito diminuisce fino a raggiungere il picco di 83° in corrispondenza del movimento di rotazione dell'avambraccio per poi aumentare e tornare al valore nullo della posizione iniziale. Il valore di range di movimento della prova risulta essere circa pari al valore trovato in letteratura compreso tra gli 85° e i 90° .

La figura 7.32 riporta gli step di movimento della pronazione e l'andamento dell'angolo al gomito durante il movimento di pronazione.

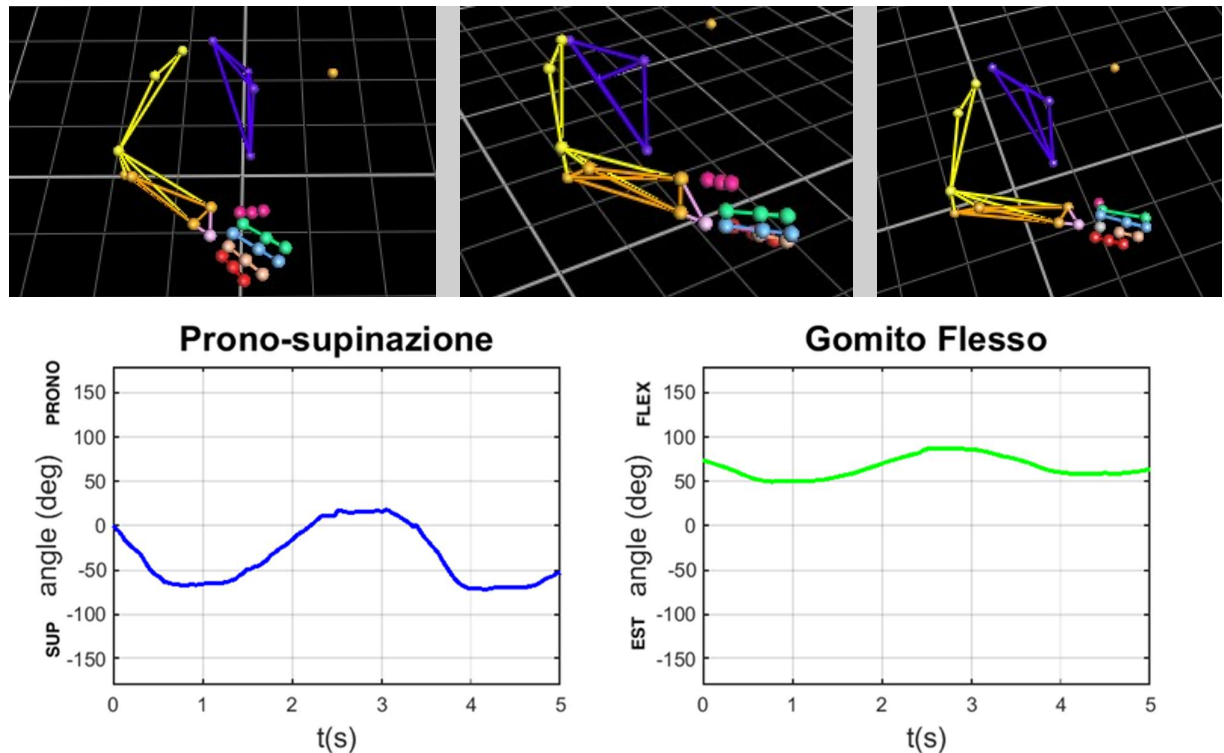


Figura 7.32 Step di movimento della pronazione e andamento dell'angolo al gomito durante la prova

8. FLESSO- ESTENSIONE DELLE DITA

In entrambi i soggetti si è osservato il movimento di flesso-estensione delle dita. I soggetti hanno come posizione di partenza le dita flesse e appoggiate sul pollice; i valori di flessione di partenza delle dita sono riportate nella tabella sottostante.

SOGGETTO	MCP_P	MCP_I	MCP_M	MCP_A	MCP_Mi
S₂	<i>Non visibile</i>	69°	69°	$59,1^\circ$	63°
S₃	$30,3^\circ$	$48,4^\circ$	$46,2^\circ$	$47,6^\circ$	$42,6^\circ$

Tabella 18 Angoli di flessione dell' articolazione metacarpo- falangea nella posizione di partenza

I valori dell'estensione delle dita registrata dal modello è fisiologica: valori al di sotto dei range fisiologici trovati in letteratura sono dovuti al fatto che il soggetto non effettua una flessione totale

bensi una chiusura delle dita lunghe sul pollice; la scelta di non effettuare una flessione totale è dovuta al fatto che la flessione totale avrebbe oscurato tutti i marker posti sulla mano. Dai grafici (figura 7.33) però si nota che tutte le dita si comportano al medesimo modo effettuando un'estensione simile sia in termini di ampiezze comprese tra i $65,6^\circ$ e gli 84° per il soggetto S_2 e tra i $47,8^\circ$ e i $64,3^\circ$ per il soggetto S_3 che di andamento. Il range limitato delle ampiezze della prova è dovuto alla visibilità del marker.

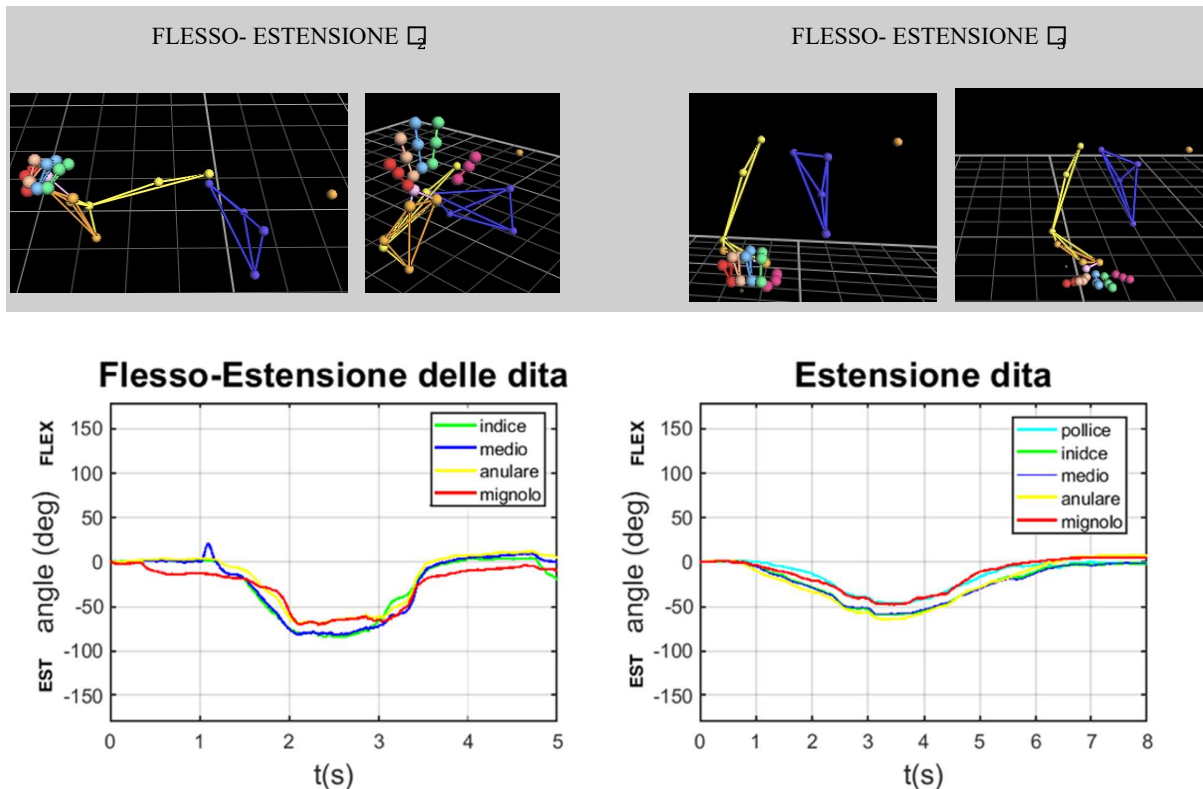


Figura 7.33 Step di movimento e andamento della prova di flesso-estensione delle dita

9. SUPINAZIONE COMBINATA ALLA FLESSO - ESTENSIONE DELLE DITA

Il movimento combinato viene osservato nel soggetto S_3 ; il soggetto contemporaneamente alla supinazione estende le dita. Come durante la prova pura il soggetto S_3 non effettua una vera supinazione ma rotazione dell'avambraccio poco oltre la posizione di riferimento anatomica. La posizione di partenza del soggetto prevede il gomito sollevato e ruotato $5,4^\circ$, abdotto di 11° e flesso di $76,9^\circ$.

Nella posizione di partenza il soggetto ha le dita estese anche se permane una minima flessione iniziale come indicato in tabella 19.

<i>SOGGETTO</i>	<i>MCP_I</i>	<i>MCP_M</i>	<i>MCP_A</i>
<i>S₃</i>	<i>7,15°</i>	<i>16,1°</i>	<i>11,9°</i>

Tabella 19 Angolo di flessione dell'articolazione metacarpo-falangea nella posizione iniziale durante la prova combinata di supinazione + flessio-estensione dita

Il grafico che descrive il movimento di pronazione ha un andamento confrontabile con quello che ricavato per il movimento puro. Il range di movimento della prova pari a 71,7° è confrontabile con i limiti fisiologici trovati in letteratura e pari a 85°-90° e confrontabile con l'ampiezza ricavata dalla prova di pronazione precedentemente discussa.

Durante la prova combinata si occludono i markers del pollice e del mignolo per cui il grafico riporta il range di flessio-estensione dell'indice, del medio e dell'anulare. I valori di range di movimento della prova di estensione delle dita lunghe sono compresi tra i valori di 52° e 88°; confrontando i risultati ottenuti dalla prova combinata con quelli della prova di estensione delle dita si osserva che i range di movimento è simile; l'unica differenza riguarda l'ampiezza di movimento del dito medio che si discosta di circa 20° rispetto al valore trovato durante la prova di estensione.

Gli step di movimento effettuati dal soggetto e l'ampiezza degli angoli delle dita e del gomito sono riportati in *figura 7.34*

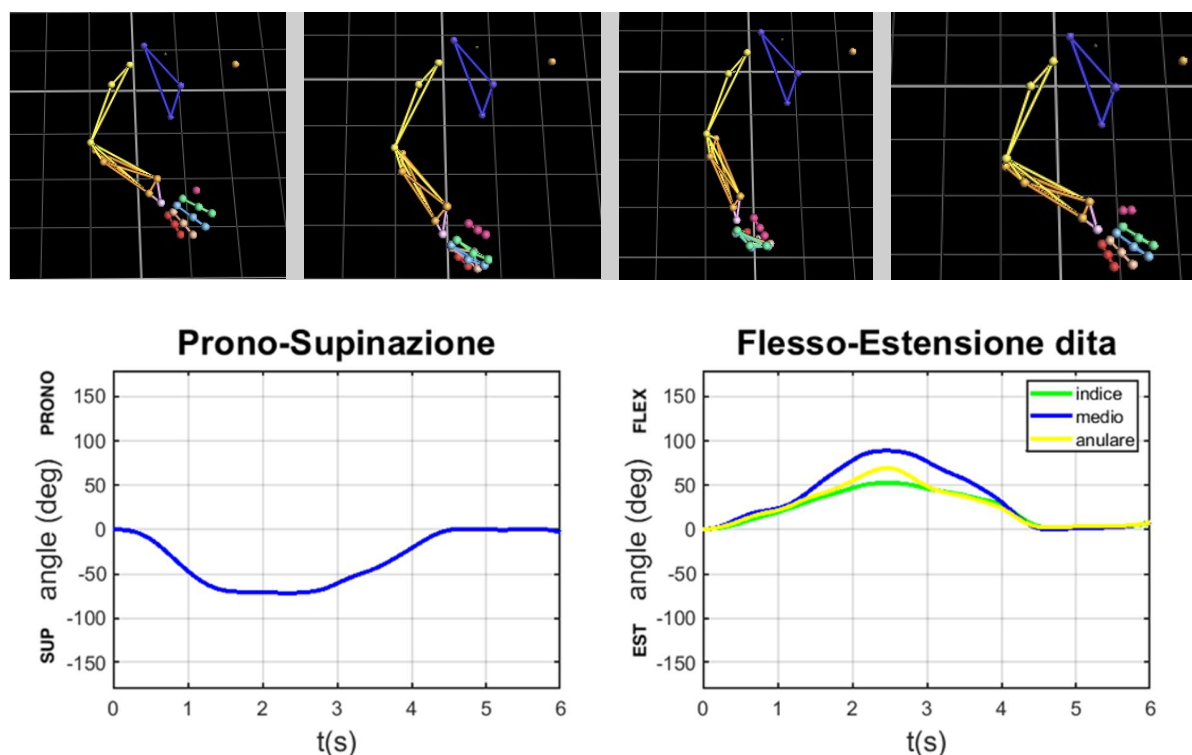


Figura 7.34 Step di movimento e andamento degli angoli delle dita lunghe e del gomito durante la prova combinata

La valutazione della seguente prova è di particolare interesse in ambito clinico in quanto mediante la prova di supinazione dell'avambraccio combinata con la flessione-estensione delle dita in quanto consente la valutazione di un eventuale recupero del paziente dopo che ha subito l'intervento di nerve transfer che prevede il trasferimento del nervo radiale al nervo interosseo posteriore (PIN). I valori registrati dal modello nella prova condotta su soggetti sani possono essere usati come confronto fisiologico del recupero del soggetto tetraplegico post intervento.

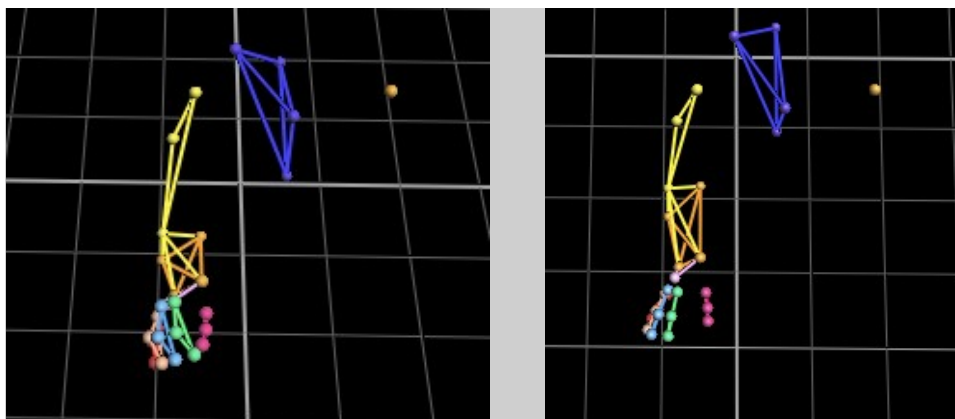
10. FLESSO -ESTENSIONE DELL'INDICE E DEL POLLICE (PINCH)

La prova di flessione-estensione del dito indice e del dito pollice ha come posizione di partenza le due dita flesse l'una sull'altra; nel dettaglio il pollice risulta flesso di $34,8^\circ$ e l'indice di $64,7^\circ$.

Confrontando i dati ottenuti dall'analisi con la ripresa video della prova si osserva che il valore di flessione dell'articolazione metacarpo falangea del pollice è circa costante, vi è una variazione di 6° , durante tutto il movimento in quanto è l'indice a chiudersi sul pollice.

Il valore del range of motion dell'articolazione metacarpo falangea dell'indice è pari alla metà del valore di range di movimento fisiologico: anche in questo caso il risultato è coerente con le aspettative in quanto l'indice flettendosi sul pollice arresta la sua corsa a circa metà del range di movimento che avrebbe qualora fosse effettuata un'estensione completa.

Gli step di movimento effettuati dal soggetto e l'ampiezza degli angoli di indice e di pollice durante il movimento di pinch sono riportati in *figura 7.35*.



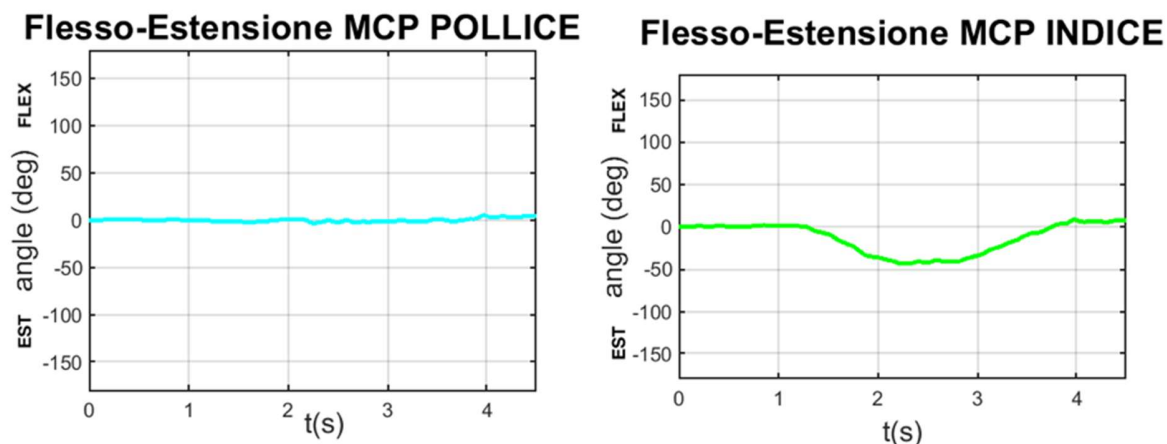


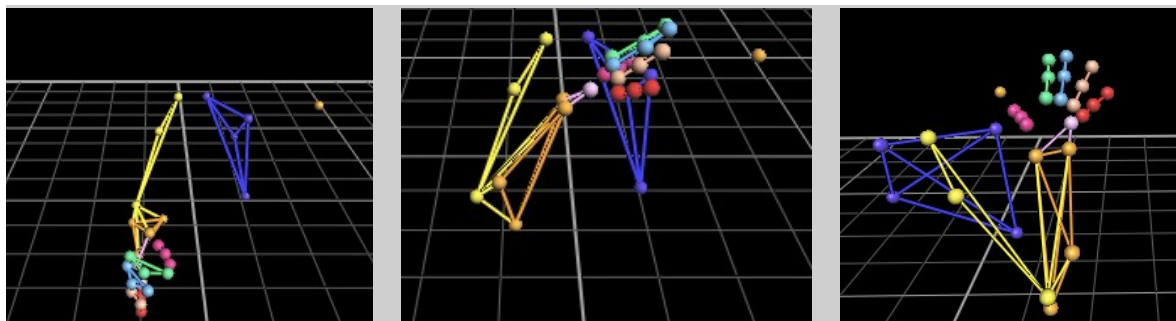
Figura 7.35 Step di movimento e andamento degli angoli dell'indice e del pollice lunghe durante di pinch

11. FLESSO -ESTENSIONE DELL'INDICE E DEL POLLICE (PINCH) COMBINATA AL MOVIMENTO DI FLESSO-ESTENSIONE DI GOMITO

Il soggetto a inizio prova presenta una flessione di gomito pari a $56,4^\circ$ e una flessione dell'articolazione metacarpo falangea dell'indice e del pollice rispettivamente pari a $56,5^\circ$ e $28,05^\circ$.

Durante la prova il soggetto effettua una flessione totale di gomito e l'estensione simultanea di indice e pollice. Il gomito si flette raggiungendo il valore di flessione totale pari a $136,4^\circ$, valore fisiologicamente accettabile: il range di movimento della flessione è di circa 80° poco inferiore al valore fisiologico atteso pari a 90° .

Per quanto riguarda le dita si osserva che l'indice si comporta in maniera analoga alla prova di flesso-estensione combinata di indice- pollice ricavando un range di movimento variabile tra i 50° e i 56° . (figura 7.36)



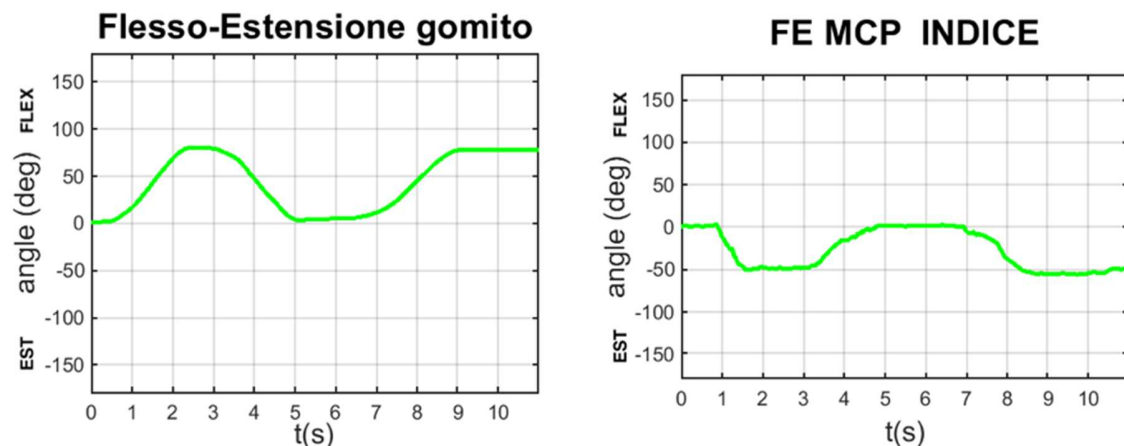
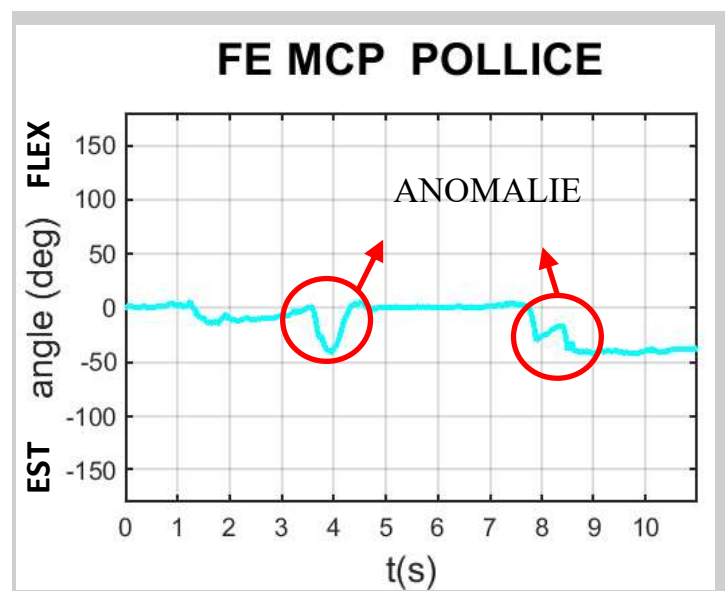


Figura 7.36 Step di movimento e angolo al gomito e dell'indice ottenuti dalla prova di flessione di gomito combinata alla flesso-estensione del dito indice e del pollice

Il grafico che descrive il range di movimento dell'articolazione metacarpo falangea presenta delle anomalie: il grafico è normalizzato rispetto alla posizione di partenza che prevede una flessione iniziale di $28,05^\circ$ per cui durante la fase di estensione ci si aspetterebbe l'andamento di una curva crescente che raggiunge il picco in corrispondenza della massima estensione. In realtà durante l'estensione si osserva un picco a zero, che rappresenterebbe il valore di flessione iniziale, a causa di un errore durante la labellizzazione e durante il riconoscimento dei markers posizionati sul pollice dovuti alla complessità del movimento molto ridotto rispetto al volume di cattura come mostrato in figura 7.37



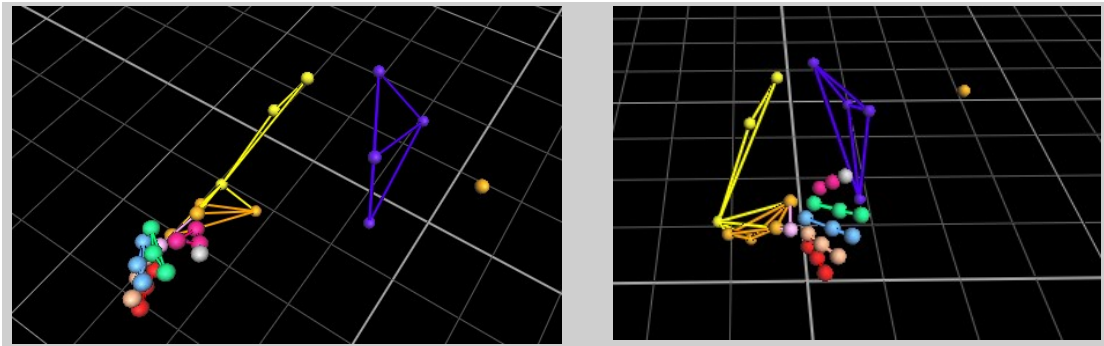


Figura 7.37 Angolo del pollice durante il movimento di pinch combinato alla flessione-estensione dl gomito

La valutazione della seguente prova è di particolare interesse in ambito clinico in quanto mediante la prova di flessione-estensione combinata delle dita combinata con la flessione di gomito è possibile valutare l'eventuale recupero del paziente dopo che ha subito l'intervento di nerve transfer che prevede il trasferimento del nervo muscolocutaneo, che decorre lungo il braccio innervando il brachiale, al nervo interosseo anteriore (AIN).

I valori registrati dal modello possono essere usati come confronto fisiologico del recupero del soggetto tetraplegico post intervento.

SOGGETTO	PROVA	ANGOLO DI EULERO XYZ	ROM DELLA PROVA	ROM FISIOLLOGICO
S₁	ROTAZIONE NATURALE	SPALLA	148,56°	175°
	ROTAZIONE SELETTIVA	SPALLA	107,45°	
	ESTENSIONE ANTI GRAVITÀ	GOMITO	144,4°	ATTIVA:145° PASSIVA:160°
	ESTENSIONE PRO GRAVITÀ	GOMITO	146,5°	
	ESTENSIONE SU PIANO NEUTRO	GOMITO	138,7°	
	FLESSO-ESTENSIONE	GOMITO	144,7°	
	ESTENSIONE SU TAVOLINO	GOMITO	76,5°	90°
	ROTAZIONE SPALLA+ ESTENSIONE	SPALLA GOMITO	122,8° 132°	170° 145°

	PRO GRAVITÀ			
S ₂	PRONO-SUPINAZIONE	POLSO	141,8°	180°
	FLESSIONE (SOGGETTO AL CENTRO DELLO SPAZIO DI CATTURA)	GOMITO	127,7°	ATTIVA:145° PASSIVA:160
	FLESSOIONE (SOGGETTO DI FRONTE A UNA TELECAMERA IR)	GOMITO	130,5	
	FLESSIONE SU PIANO NEUTRO	GOMITO	131°	
	FLESSO-ESTENSIONE PRO GRAVITÀ	GOMITO	144,9°	
	PRONO-SUPINAZIONE	POLSO	125,8°	180°
	FLESSO-ESTENSIONE MCP dita lunghe	ANGOLO INDICE, MEDIO,ANULARE, MIGNOLO	65,6°<RoM<84°	120°
	PRONAZIONE	GOMITO	83°	85°-90°
	FLESSO-ESTENSIONE MCP_dita lunghe e pollice	ANGOLO POLLICE, INDICE,MEDIO,ANULARE, MIGNOLO	47,8°<RoM<64,3	120°
	SUPINAZIONE+ FLESSO-ESTENSIONE DITA	ANGOLO INDICE,MEDIO,ANULARE, POLSO	I:50° M:88,3° A:68,8° 71,7°	120° 85°-90°
S ₃	PINCH	ANGOLO POLLICE, INDICE	50° 6°	
	PINCH+ FLESSO-ESTENSIONE DI GOMITO	ANGOLO POLLICE, INDICE GOMITP	P:40,7° <RoM<42,3° I:49,4° <RoM<56° G:77°<RoM<80°	

Tabella 20 Tabella riassuntiva dei RoM delle prove

8 Conclusioni

Il presente progetto di tesi si propone di sviluppare un modello cinematico dell'arto superiore che descriva nel dettaglio la mano composto da 9 segmenti anatomici, descritti da 29 markers applicati su appositi punti di repere anatomici, per la valutazione biomeccanica del range di movimento delle articolazioni e per la quantificazione del recupero del movimento post intervento di nerve transfer.

Gli angoli relativi calcolati tra i segmenti anatomici adiacenti sono stati scelti come risultati di interesse. Il confronto effettuato tra i risultati registrati dal modello, durante le prove effettuate sui soggetti sani, e i range di movimento articolari ricavati dallo studio della letteratura consente di affermare che il modello registra correttamente i movimenti ed è quindi affidabile e conforme per l'esecuzione di valutazioni biomeccaniche nell'analisi dell'arto superiore.

Dalle analisi condotte, si ritiene che il modello, inizialmente sviluppato per testare il recupero dei movimenti dell'arto superiore in pazienti tetraplegici che hanno subito l'intervento di nerve transfer, può essere utilizzato come supporto alla riabilitazione per testare il recupero dell'arto superiore anche in pazienti che presentano patologie diverse.

Nonostante ciò, appaiono evidenti alcune limitazioni, tra cui lo studio su una popolazione di soli tre soggetti di genere femminile e la mancata applicazione sul soggetto patologico. Per effettuare una corretta validazione del modello è necessario coinvolgere una popolazione più ampia, ipotizzare nuove prove che possano riprodurre i movimenti del muscolo ricevente e del donatore così da testimoniare il fatto che il movimento del muscolo donatore è compensato dall'attivazione di altri muscoli ed effettuare un confronto con un altro modello o un'altra strumentazione, come ad esempio i sensori inerziali (IMUs). Dato che i soggetti devono effettuare dei movimenti complessi si ritiene opportuno ottimizzare ulteriormente il posizionamento delle telecamere al fine di restringere il volume di cattura.

Tra gli altri sviluppi futuri di questo studio, si prevede l'applicazione clinica del modello e si ipotizza la visualizzazione delle singole traiettorie dei marker applicati sul soggetto in quanto nei pazienti il minimo recupero può non essere quantificabile da un parametro di spostamento angolare ma lo si potrebbe quantificare mediante l'analisi di un parametro lineare. Come precedentemente detto il modello può essere usato anche di supporto alla riabilitazione dell'arto superiore per pazienti che presentano patologie differenti da quelle analizzati nel seguente studio.

Trattandosi di uno studio preliminare non vi è un protocollo standard da seguire durante le analisi ed il modello può essere utilizzato per la valutazione cinematica di differenti movimenti, facendo però attenzione alla possibilità di occlusione dei marker.

9 Ringraziamenti

Ringrazio la Professoressa Laura Gastaldi per avermi dato l'opportunità di mettere in pratica le nozioni apprese durante questo percorso di studio.

Grazie al Dottor Ugo Dimanico e a tutto lo staff del reparto ospedaliero di fisiatria dell'Unità Spinale Unipolare di Torino con cui ho avuto il piacere di collaborare.

Grazie all' Ing. Elisa Panero per essere stata sempre disponibile, pronta a risolvere ogni dubbio e a supportarmi durante questo lavoro effettuato in un periodo storico complesso.

10 Bibliografia

- [1] A. V. A. W. R. M. T. P. E. R. Richard L. Drake, GRAY'S ATLAS OF ANATOMY, CHURCHILL LIVINGSTONE ELSEVIER, 2015, second edition.
- [2] I. Kapandji, "Fisiologia articolare ,volume I° arto superiore", Marrapese Editore Demi, 1974.
- [3] M.W. Whittle, Gait Analysis -an introduction, fourth edition a cura di, Butterworth-Heinemann Ltd, 2006.
- [4] P. C. C. Bignardi, «Biomeccanica della protesi di spalla,» *Minerva Ortopedica e Traumatologia*, vol. 43, n. 6, pp. 413-423, 1992.
- [5] [Online].
- [6] I. Kapandji, "Fisiologia Articolare- volume I° arto superiore", Marrapese editore Demi, 1974.
- [7] M. Frank H. Netter, Atlas Of Human Anatomy, Sixth Edition a cura di, Saunders Elsevier, 2014.
- [8] Istituto Ortopedico Rizzoli , [Online]. Available: <http://www.ior.it/curarsi-al-rizzoli/gomito-la-rigidità-del-gomito>.
- [9] P. HP, «The obliquity of the arm of the female in extension,» *Journal of Anatomical Physiology*, pp. 488-491., 1985.
- [10] A. Steindler, Kinesiology of the human body under normal and pathological conditions,, CHARLES C THOMAS, Springfield, Illinois, 1973,.
- [11] A. F. D. Keith L. Moore, Anatomia Umana, CEA Casa Editrice Ambrosiana , 2008.
- [12] B. R. M. ., L. M. R. Anne M. Gilroy, "Atlante di anatomia -Prometheus", Terza Edizione a cura di, Edises.
- [13] unife. [Online]. Available: <http://www.unife.it/medicina/fisioterapia/minisiti-fe/anatomia-umana-e-istologia/modulo-di-anatomia-speciale/anatomia-speciale-2017-2018/arto-superiore-2>.
- [14] abcsalute.it. [Online]. Available: <http://www.abcsalute.it/atlane-anatomico/apparato-muscolare/uomo/muscolo-abduttore-del-mignolo>.
- [15] asia-spinalinjury.org. [Online]. Available: <https://asia-spinalinjury.org/international-standards-neurological-classification-sci-isncsci-worksheet/>.
- [16] profusionrehab.com. [Online]. Available: <https://profusionrehab.com/spinal-cord-injury/>.
- [17] mrc.ukri.org. [Online]. Available: <https://mrc.ukri.org/research/facilities-and-resources-for-researchers/mrc-scales/mrc-muscle-scale/>.
- [18] M. Michelle A. James, «Use of the Medical Research Council Muscle Strength Grading System in the Upper Extremity,» *The Journal of Hand Surgery* , vol. 32, n. 154-156, 2007.
- [19] theguardian. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/04/pioneering-surgery-brings-movement-back-to-paralysed-hands>.
- [20] J. B. P. P. C. S. G. S. Silvia Olivi, «Metodiche innovative di chirurgia funzionale e reinnervazione per il recupero della funzione dell'arto superiore nella persona con lesione midollare,» in 28° *Corso Di Aggiornamento Ricerca e innovazione in Medicina Riabilitativa*, Riccione, 2017.
- [21] J. M. G. a. C. T. Bertelli, «Transfer of the teres minor motor branch for triceps reinnervation in tetraplegia,» *Journal of Neurosurgery*, pp. 1457-60., 2011.
- [22] J. B. H. C. A. C. ., M. D. W. ., S. J. F. M. P. G. Natasha van Zyl, «Upper limb reinnervation in C6 tetraplegia using a triple nerve transfer: case report.,» *J Hand Surg Am*, pp. 1779-83., 2014.

- [23] C. P. T. ., E. C. W. D. ., M. F. G. ., H. D. Jayme Augusto Bertelli, «Transfer of axillary nerve branches to reconstruct elbow extension in tetraplegics: a laboratory investigation of surgical feasibility.,» *Microsurgery*, pp. 376-81., 2011.
- [24] J. a. A. G. Friden, «Brachialis-to-extensor carpi radialis longus selective nerve transfer to restore wrist extension in tetraplegia: case report.,» *J Hand Surg Am*, pp. 1606-8., 2012.
- [25] K. M. D. C. B. N. G. H. L. C. K. N. J. R. R. a. S. E. M. Ida K. Fox, «Use of peripheral nerve transfers in tetraplegia: evaluation of feasibility and morbidity.,» *Hand (N Y)*, pp. 60-7., 2015.
- [26] S. A. Y. a. W. R. Mackinnon, «erve transfers for the restoration of hand function after spinal cord injury.,» *J Neurosurg*, pp. 176-185., 2012.
- [27] J. a. M. G. Bertelli, «Nerve transfers for restoration of finger flexion in patients with tetraplegia.,» *J Neurosurg Spine*, pp. 55-61., 2017.
- [28] V. L. M. L. ., C. P. T. ., E. C. W. D. ., M. F. G. ., H. D. Jayme Augusto Bertelli, « Transfer of the distal terminal motor branch of the extensor carpi radialis brevis to the nerve of the flexor pollicis longus: an anatomic study and clinical application in a tetraplegic patient.,» *Neurosurgery*, pp. 1011-6., 2012.
- [29] J. a. M. G. Bertelli, «Nerve transfers for elbow and finger extension reconstruction in midcervical spinal cord injuries.,» *J Neurosurg*, pp. 121-7., 2015.
- [30] C. P. T. ., M. F. G. ., P. R. K. ., M. A. S. Jayme A Bertelli, «Transfer of supinator motor branches to the posterior interosseous nerve to reconstruct thumb and finger extension in tetraplegia: case report.,» *J Hand Surg Am*, pp. 1647-51, 2010.
- [31] B. H. C. C. J. H. M. P. G. Natasha van Zyl, «"Expanding traditional tendon-based techniques with nerve transfers for the restoration of upper limb function in tetraplegia: a prospective case series",» *The Lancet*, vol. Vol 394 , 2019.
- [32] M. R. COUNCIL, «<https://mrc.ukri.org/research/facilities-and-resources-for-researchers/mrc-scales/mrc-muscle-scale/>,» 1975. [Online].
- [33] H. C.-l. G. Y.-d. S. Q.-l. a. G. S.-b. ZHENG Xian-you, «" Repair of brachial plexus lower trunk injury by transferring brachialis muscle branch of musculocutaneous nerve: anatomic feasibility and clinical trials ",» *Chinese Medical Journal*, pp. 99-104, 2008.
- [34] . F. C. A. G. I. L. C. S. A. D. C. M. S. B. B. Paolo Titolo, «"Combining nerve and tendon transfers in tetraplegia: a proposal of a new surgical strategy based on literature review ",» *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, p. 521–530, 2019.
- [35] O. Pietro, «TRASFERIMENTI TENDINEI IN CHIRURGIA DELLA MANO,» *Collana di Aggiornamenti _TRASFERIMENTI TENDINEI IN CHIRURGIA DELLA MANO*, 1997.
- [36] K. M. D. C. B. N. G. H. L. C. K. ., J. R. R. ., E. M. Ida K. Fox, «Use of peripheral nerve transfers in tetraplegia: evaluation of feasibility and morbidit,» *HAND*, pp. 60-67, 2015.
- [37] J. L. a. T. L. Kunii, «Model-Based Analysisi of Hand Posture,» *IEEE Computer Graphics and Application* , pp. 77-86, 1995.
- [38] Y. W. T. S. H. John Lin, «3D modelling of humam hand with motion capture,» in *International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM '97)*, Ottawa, Ontario, Canada, 12-15 maggio 1997.
- [39] J. P. D. M. N. I. .-N. G. F. L. R. Degeorges, «Three-dimensional rotations of human three-joint fingers: an optoelectronic measurement. Preliminary Result,» *Surgical and Radiologic Anatomy*, pp. 43-50, 2004.

- [40] E. D. M. N. L. G. B.-B. R. M. L. B. a. G. F. P. CERVERI, «Finger Kinematic Modeling and Real-Time Hand Motion Estimation,» *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 35, n. 11, p. 1989–2002, 2007.
- [41] J. J. a. M. F. Ilaria Carpinella, «Multi-finger coordination in healthy subjects and stroke patients: a mathematical modelling approach,» *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, pp. 1-19, 2011.
- [42] Elisa Digo, Mattia Antonelli, Valerio Cornagliotto, Stefano Pastorelli and Laura Gastaldi, «Collection and Analysis of Human Upper Limbs Motion Features for Collaborative Robotic Applications,» *Robotics*, pp. 1-12, 2020.
- [43] vicon, [Online]. Available: <https://www.vicon.com/software/nexus/>.
- [44] C. e. d. M. Università di Cagliari_ Dipartimento di Ingegneria Meccanica, «https://people.unica.it/pau/files/2015/09/3_Stereofotogrammetria_.pdf,» [Online].
- [45] C. Ferraresi, «Politecnico di Torino,» [Online]. Available: <https://file.didattica.polito.it/download/MATDID/32828213>.
- [46] N. L. A. P. a. G. F. P. CERVERI, «Derivation of Centers and Axes of Rotation for Wrist and Fingers in a Hand Kinematic Model: Methods and Reliability Results,» *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 33, p. 402–412, 2005.
- [47] P. M. M. R. R. T. M. F. I. Carpinella, «Experimental protocol for the kinematic analysis of the hand: Definition and repeatability,» *Gait & Posture*, vol. 23, p. 445–454, 2006.
- [48] J. P. D. M. N. I. J.-N. G. F. L. R. Degeorges, «Three-dimensional rotations of human three-joint fingers: an optoelectronic measurement. Preliminary results,» *Surgical and Radiologic Anatomy*, pp. 43-50, 2005.
- [49] qualisys, [Online]. Available: <https://www.qualisys.com/accessories/>.
- [50] GPem, [Online]. Available: <https://www.gpem.net/copia-di-imu-suite>.
- [51] Vicon, 2020. [Online]. Available: <https://docs.vicon.com>.