

**Università di Bologna**

**DIEM**

**Dipartimento di ingegneria delle costruzioni meccaniche,  
nucleari, aeronautiche e di metallurgia**

**Definizione, acquisizione sperimentale ed  
elaborazione di traiettorie di riferimento della  
mano umana per la sintesi di architetture  
protesiche di arto superiore**

*Report interno a cura di:*

**Ing. Corrado Borghi**

**Ing. Marco Troncossi**

**Prof. Vincenzo Parenti Castelli**

**2007**

## Abstract

This paper reports an essential part of a wider research activity, which entails the development of a procedure for the Determination of the Optimal Prosthesis Architecture (DOPA) for a given upper limb amputee. A fundamental algorithm of the DOPA procedure performs the kinematic analysis of several prosthetic arm models (also with less than the six degrees of freedom normally required to correctly execute a generic manipulation task). The algorithm must simulate the execution of important daily living activities performed by a prosthesis and thus it requires reference trajectories of the hand. By means of experimental analysis, 59 trajectories of the hand of an able-bodied subject were acquired to identify a modality to correctly perform the corresponding tasks. This paper illustrates in detail the stages of task analysis, experimental acquisition and data processing in order to define the required reference trajectories. The obtained reference trajectories are a temporal succession of the hand pose (position and orientation). A customized algorithm automatically selects the most relevant poses to be considered for the definition of the reference trajectory. The hand pose is reported in the Cartesian Space by means of Natural Coordinates. In order to correctly execute a given task the pose error admitted for the end-effector of the different architectures is associated to each trajectory. In particular, the critical problem to express the orientation error is solved by means of the use of Spherical Rotation Coordinates.

## Sommario

Il lavoro svolto si colloca come parte integrante ed essenziale in uno studio più ampio, che consiste nell'elaborazione di una procedura finalizzata alla determinazione dell'architettura protesica ottimale per un dato paziente amputato d'arto superiore (DOPA: Determination of the Optimal Prosthesis Architecture). Un fondamentale algoritmo della DOPA esegue l'analisi cinematica di diversi modelli di arto protesico (anche quelli con meno dei sei gradi di libertà necessari per l'esecuzione corretta di un generico compito di manipolazione). Tale algoritmo richiede l'impiego di traiettorie di riferimento della mano per rappresentare importanti attività di vita quotidiana. Questo report descrive la definizione di tali traiettorie di riferimento. Per mezzo di un'analisi sperimentale, sono state determinate 59 traiettorie della mano di un soggetto normodotato che permettessero di identificare una modalità di esecuzione corretta dei compiti corrispondenti. Lo studio illustra nel dettaglio le tre fasi di analisi dei compiti, acquisizione sperimentale ed elaborazione dei dati per l'ottenimento di adeguate traiettorie di riferimento. Le traiettorie così ottenute sono costituite dalla successione temporale (in istanti selezionati con un apposito algoritmo) della posa (posizione e orientamento) della mano. La posa viene definita nello Spazio Cartesiano tramite Coordinate Naturali. Alle traiettorie è inoltre associato l'errore di posa che può essere commesso dal manipolatore dall'architettura affinché quest'ultima possa eseguire correttamente un dato compito. In particolare, il problema critico di valutare l'errore di orientamento è stato risolto utilizzando le Coordinate Sferiche di Rotazione.

# Indice

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMARIO</b> .....	<b>2</b>
<b>INDICE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>2 ANALISI DEI COMPITI</b> .....	<b>5</b>
2.1 STRATEGIE ALTERNATIVE E MOVIMENTI COMPENSATORI .....	6
2.2 IMPIEGO DI AUSILI .....	7
2.2.1 <i>Igiene personale</i> .....	7
2.2.2 <i>Indossare abiti</i> .....	8
2.2.3 <i>Attività generiche</i> .....	8
2.3 DEFINIZIONE DEI COMPITI.....	9
<b>3 METODO PER L’OTTENIMENTO DELLE TRAIETTORIE DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>11</b>
3.1 SCELTA DEL METODO: ANALISI DEL MOVIMENTO .....	11
3.2 STRUMENTI IMPIEGATI .....	12
3.3 ACQUISIZIONE DELLE TRAIETTORIE DI RIFERIMENTO .....	12
3.3.1 <i>Posizionamento dei marcatori</i> .....	12
3.3.2 <i>Prove statiche</i> .....	13
3.3.3 <i>Utilizzo delle mani</i> .....	13
3.4 ACQUISIZIONE DEI MOVIMENTI DEL CINGOLO SCAPOLARE E DEL COLLO .....	14
3.5 RISULTATI .....	14
3.5.1 <i>Traiettorie di riferimento</i> .....	14
3.5.2 <i>Ampiezza di movimento del cingolo scapolare</i> .....	16
<b>4 DEFINIZIONE DELLE TRAIETTORIE DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>16</b>
4.1 VERIFICA DI CONGRUENZA TRA MANO SANA DELL’ACQUISIZIONE E MANO MIOELETTICA DEL MODELLO DI ARCHITETTURA PROTESICA .....	17
4.2 DESCRIZIONE DI POSIZIONE E ORIENTAMENTO DELLA MANO NELLO SPAZIO .....	21
4.3 INDIVIDUAZIONE DEI NODI .....	22
4.3.1 <i>Smoothing della traiettoria</i> .....	23
4.3.2 <i>Determinazione del raggio di curvatura della traiettoria</i> .....	24
4.3.3 <i>Determinazione dei minimi relativi del raggio di curvatura</i> .....	24
4.3.4 <i>Riduzione del numero dei nodi</i> .....	25
4.4 DEFINIZIONE DEGLI ERRORI AMMISSIBILI .....	26
4.4.1 <i>Definizione tramite coordinate naturali</i> .....	27
4.4.2 <i>Definizione tramite posizione e orientamento relativi di sistemi di riferimento</i> .....	27
<b>5 CONCLUSIONI</b> .....	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>40</b>
<b>APPENDICE A. FILMATI INAIL</b> .....	<b>41</b>
<b>APPENDICE B. PROTOCOLLO DI ACQUISIZIONE</b> .....	<b>41</b>
B.1 POSIZIONAMENTO DEGLI OGGETTI.....	41
B.2 POSIZIONAMENTO DEI MARCATORI.....	42
<b>APPENDICE C. RISULTATI DELL’ACQUISIZIONE</b> .....	<b>44</b>
C.1 PRIMA ELABORAZIONE DEI DATI.....	44
C.2 FORMATO DATI.....	44
<b>APPENDICE D. FORMATO DATI DELLE TRAIETTORIE DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>45</b>

# 1 Introduzione

Il presente lavoro si inserisce nel contesto di uno studio più ampio [1], finalizzato a fornire, per mezzo di una idonea procedura, nuove linee guida per la progettazione di protesi d'arto superiore. A tale procedura viene dato il nome di *DOPA* (Determination of the Optimal Prosthesis Architecture). La procedura DOPA consiste in un metodo per la valutazione globale di architetture di arti protesici. Per architettura si intende la geometria e topologia di un modello di braccio robotico, ovvero qual è il numero, tipo e posizionamento dei giunti sulla protesi. La valutazione si basa quindi su un modello semplificato della protesi, che permette di determinare l'efficacia di una data configurazione di giunti, prescindendo dalle problematiche costruttive.

Il procedimento è orientato al soggetto, ovvero una protesi è da ritenersi soddisfacente nel momento in cui questa risponde alle esigenze del soggetto stesso. Tali esigenze sono costituite da un bilanciamento di requisiti contrastanti, quali funzionalità, flessibilità, comodità ed estetica [2][3]. Mentre l'estetica, pur essendo di grande rilevanza, è stata considerata un elemento esulante dagli scopi della DOPA, gli altri tre aspetti vengono contemplati per l'elaborazione di un indice di valutazione globale. In sostanza alla DOPA sono fornite in ingresso le informazioni rilevanti riguardanti il paziente e questa produce come uscita l'indicazione sulle architetture protesiche ottimali per quel paziente. Estendendo l'indagine a molti soggetti amputati, da questi dati sarà possibile individuare quali siano le architetture in generale più efficaci e idonee per il maggior numero di pazienti, ottenendo così un'indicazione per orientare la progettazione di nuove protesi e articolazioni.

L'ambito specifico della DOPA che sarà trattato in questo report riguarda la determinazione della risposta dell'architettura al requisito di funzionalità, intendendo per funzionalità l'abilità della protesi nello svolgere attività utili al paziente. Per quanto riguarda questo campo, a differenza degli approcci riscontrati in letteratura per le protesi [4], si è operato con una metodologia simile a quella impiegata nello studio di *Romilly et al.* [5] nell'ambito delle ortesi. Si utilizza, cioè, un programma di simulazione cinematica appositamente sviluppato per verificare la capacità di una data architettura di eseguire determinati compiti. Le differenze dal lavoro sopra citato, che saranno mostrate nel dettaglio nei capitoli successivi, comprendono l'utilizzo di un numero maggiore di compiti per la simulazione e una loro apposita standardizzazione e modellazione. I compiti considerati si rifanno a insiemi di azioni di vita quotidiana reperiti in letteratura [1-12]. Le azioni sono generalmente definite *Activities of Daily Living (ADL)*.

La verifica di funzionalità avviene nel seguente modo: l'algoritmo di simulazione cinematica (*KiS*) riceve in ingresso una possibile architettura di braccio protesico. Ogni architettura, per eseguire un dato compito, deve compiere col proprio organo terminale (in questi caso un modello della mano mioelettrica) una determinata traiettoria, definita in posizione e orientamento. Il simulatore genera la traiettoria ottimale con cui l'architettura può eseguire il compito, detta *traiettoria simulata*, in modo che questa si avvicini il più possibile alla traiettoria che lo caratterizza, detta *traiettoria di riferimento*. Se l'errore con cui l'architettura compie la traiettoria simulata supera un valore ammissibile fissato per il dato compito, tale architettura non è considerata idonea a eseguire quel compito. Il conteggio dei compiti che ciascun modello di robot è in grado di portare a termine fornisce un indice di merito sulle sue caratteristiche di funzionalità.

Questo lavoro si è focalizzato su tre aspetti, ad ognuno dei quali è stato dedicato un capitolo:

- *analisi dei compiti*: non essendo definita una precisa standardizzazione delle attività di vita quotidiana [4] si è resa necessaria un'apposita caratterizzazione dei compiti, tenendo conto delle esigenze richieste dall'obiettivo proposto, che è quello di fornire nuove linee guida per la progettazione di protesi d'arto superiore;

- *individuazione delle traiettorie di riferimento*: una volta definiti i compiti, si è dovuto identificare e implementare un opportuno metodo per ottenere le relative traiettorie di riferimento. Lo strumento scelto è stato l'Analisi del Movimento [5], realizzata con l'impiego del sistema optoelettronico denominato Vicon 460;
- *definizione delle traiettorie di riferimento*: dai dati ottenuti direttamente dalle acquisizioni dell'analisi del movimento, un'apposita elaborazione successiva ha permesso la determinazione di un idoneo modello delle traiettorie, ovvero una descrizione quantitativa delle specifiche che la mano deve rispettare per eseguire un determinato compito; il modello è stato pensato per essere trattato in modo efficiente dall'algoritmo di simulazione: in particolare si sono identificati posizione e orientamento della mano tramite la posizione di tre punti solidali con essa [13][14].

## 2 Analisi dei compiti

I compiti, nel contesto della DOPA, sono utilizzati per la valutazione funzionale di architetture di protesi d'arto superiore. Più precisamente, l'architettura viene giudicata in base alla sua capacità di eseguirli, verificando che il suo organo terminale sia in grado di assumere la posa corretta in determinati punti dello spazio. Questi compiti sono stati scelti fra le attività di vita quotidiana in modo che fossero il più possibile rappresentativi delle azioni compiute normalmente dall'arto superiore durante la giornata. Poiché la qualità della vita di un paziente è definita dai compiti che egli può eseguire, valutare l'architettura sulla base di questi significa fornire un'indicazione diretta sull'effettiva qualità della vita che può essere raggiunta dal paziente con una data protesi.

In letteratura sono presenti numerosi lavori in cui sono stati forniti insiemi di possibili attività di vita quotidiana, o ADL, per l'arto superiore [1-12]. La scelta di tali attività varia notevolmente in base agli scopi prefissi dai singoli studi, per cui non si può asserire che esista una lista definita e riconosciuta di ADL [4]. Non è stata identificata nessuna pubblicazione in cui ADL siano state considerate al fine della progettazione di protesi d'arto superiore. In pochi lavori si sono studiate ADL per lo sviluppo di ortesi attuate [5][10], oppure è stato analizzato il movimento del braccio per determinare alcune specifiche per la progettazione delle protesi [4].

È inoltre carente in letteratura una standardizzazione che riguardi l'esecuzione delle singole attività. In ogni studio le ADL sono caratterizzate in base alle esigenze specifiche: se ad esempio l'obiettivo è mettere a punto un'ortesi per pazienti su sedia a rotelle, occorrerà considerare che l'azione è sempre eseguita in posizione seduta ed eventualmente con poca o nulla mobilità del busto. La carenza nella standardizzazione può essere facilmente compresa per il fatto che non esiste un solo modo possibile per portare a termine un'azione. La stessa azione, quale può essere la pulizia dei denti, ad esempio, può essere compiuta con l'utilizzo o meno di uno spazzolino elettrico, con una diversa successione dei movimenti di pulizia, con maggiori o minori movimenti del viso rispetto alla mano, afferrando lo spazzolino in diverse posizioni e in diverse collocazioni nel bagno, ecc. E' presente quindi una notevole variabilità intrinseca nell'esecuzione di un'azione. Come riscontrato in alcuni lavori [5][7][12], dovranno quindi essere definiti:

- collocazione e tipo di oggetti impiegati dal soggetto;
- postura del soggetto e posizionamento iniziale.

La pur necessaria determinazione di tali aspetti non presenta tuttavia particolare difficoltà.

Di maggiore complessità risulta l'identificazione delle problematiche dovute al fatto che le ADL saranno da riferirsi a un portatore di protesi. Per l'individuazione di tali problematiche si è usufruito della collaborazione con il Centro Protesi INAIL di Vigorso di Budrio, in particolare con il Reparto

di Fisioterapia e con il Reparto Mioelettrico per gli arti superiori. È stato possibile il confronto sia con personale qualificato che con i pazienti stessi, ed è stato inoltre fornito materiale audiovisivo riguardante lo svolgimento di alcune attività da parte di pazienti. Sono emerse le notevoli limitazioni che allo stato attuale l'impiego di una protesi mioelettrica comporta, fra cui si ricordano:

- problema nel controllo, che limita ad un massimo di tre il numero delle articolazioni attuate (prensione, prono-supinazione della mano, flessione-estensione del gomito), e impone generalmente una loro attivazione sequenziale;
- assenza di abilità digitale e sensazione tattile, che riducono drasticamente le possibili operazioni e la precisione di cui invece è capace una mano sana [15];
- eventuale riduzione delle escursioni articolari.

Queste limitazioni inducono il paziente (specialmente un amputato bilaterale con alto livello di amputazione) ad adottare nuove modalità di esecuzione che gli possano permettere di adempiere ugualmente ai compiti che intende svolgere. Tali modalità possono essere riassunte nei seguenti ambiti:

- strategie alternative e movimenti compensatori [4][10][15][16];
- impiego di ausili [5].

Questi ultimi due aspetti, decisivi per una opportuna definizione dei compiti da utilizzare per le simulazioni, verranno trattati nei paragrafi seguenti.

Occorre ricordare, comunque, che non esistono, a parte pochi casi, strategie universalmente adottate dai pazienti, tali da poter essere identificate ed enumerate. Si può invece riscontrare una notevole variabilità da paziente a paziente, in base alla motivazione di quest'ultimo, alla sua abilità, alla sua fantasia, alle sue possibilità, ecc.

## **2.1 Strategie alternative e movimenti compensatori**

Con strategia alternativa si intende l'impiego di una differente modalità per l'esecuzione di un'azione rispetto a quella comunemente adottata da soggetti sani. Si può portare come esempio l'utilizzo dei denti per aprire una bustina di zucchero, impiegando una sola mano e il movimento della testa.

Con movimento compensatorio si intende l'utilizzo di movimenti del corpo normalmente non impiegati per lo svolgimento di un dato compito. I movimenti aggiuntivi vengono sfruttati in modo da compensare la mancanza di gradi di libertà nella protesi o le ridotte escursioni articolari consentite. Si può considerare come movimento compensatorio l'innalzamento della spalla e l'abbassamento della testa per portare il cucchiaio alla bocca, in modo da ovviare ad esempio a una riduzione nell'escursione articolare consentita al gomito.

Alcuni studi [16] sono stati compiuti per determinare le modalità di compensazione provocate dalla riduzione di escursione angolare su una determinata articolazione. Non sono state tuttavia reperite informazioni che riguardano specificatamente i portatori di protesi.

Di utilità rilevante per l'identificazione di questi aspetti è stata la visione di alcuni filmati riportanti l'esecuzione di diverse attività (elencate in Appendice A) da parte di due pazienti, entrambi amputati bilaterali transomerale al terzo prossimale. Le protesi da loro utilizzate sono attuate su flessione-estensione del gomito, prono-supinazione della mano e prensione.

L'osservazione dei filmati ha fornito informazioni principalmente riguardo a due ambiti:

- generica abilità che può essere raggiunta da un portatore di protesi, intesa come numero e tipo di compiti che questi può svolgere, e livello di qualità della vita che può raggiungere;

- informazioni particolari riguardo alle strategie alternative e movimenti compensatori impiegati nello svolgimento di compiti specifici, come sequenza delle azioni, posa della mano nell'afferrare gli oggetti, posizione del busto, utilizzo dei movimenti delle spalle, ecc.

## 2.2 Impiego di ausili

È stata identificata una notevole varietà di ausili potenzialmente utilizzabili da un portatore di protesi, diversi per complessità e area d'impiego. L'uso degli ausili permette infatti una semplificazione nell'esecuzione dell'azione per quanto riguarda i seguenti aspetti:

- utilizzo di un solo braccio nelle azioni in cui vengono adoperati entrambi;
- riduzione della precisione di manipolazione richiesta;
- miglioramento della presa;
- riduzione delle escursioni articolari;
- totale o parziale automazione;
- offerta di una più semplice strategia di esecuzione.

Con l'elenco e le immagini di seguito presentate si intende fornire una panoramica degli ausili principali presenti in commercio e frequentemente impiegati. Escluse le pinzette per la manipolazione fine mostrate in Figura 12, pensate appositamente per inserirsi in una mano mioelettrica, non si tratta di ausili progettati specificatamente per pazienti protesizzati. Più in generale essi sono stati elaborati per essere di supporto a pazienti con disabilità a uno o entrambi gli arti superiori.

### 2.2.1 Igiene personale



**Figura 1.** Distributore di sapone a pulsante.



**Figura 2.** Tagliaunghie con base di supporto.



**Figura 3.** Pettini, spazzole e spugne con prolunga. Di particolare interesse le spugne verdi per l'igiene intima.

Di seguito sono indicati alcuni strumenti per rendere più accessibili al paziente le operazioni di igiene e cura del corpo.

- Distributore di sapone a pulsante (Figura 1);
- Tagliaunghie con supporto (Figura 2);
- Pettini, spazzole e spugne con prolunghe e ancoraggi (Figura 3);
- Maniglie applicabili per la rotazione dei rubinetti;
- Igienizzazione automatica dei sanitari.

## 2.2.2 Indossare abiti

Sono presentati alcuni esempi di ausili utili a semplificare le azioni di vestirsi e svestirsi.

- Strumento per l'inserimento dei bottoni nell'asola (Figura 4 e Figura 7);
- Prolunga per infilare i calzini (Figura 5);
- Calzascarpe con prolunga (Figura 6);
- Anello per l'afferraggio della cerniera (Figura 8);
- Camicia con chiusura a velcro (Figura 9);



**Figura 4. Strumento per l'inserimento dei bottoni nell'asola.**



**Figura 5. Prolunga per infilare i calzini.**



**Figura 6. Calzascarpe con prolunga.**



**Figura 7. Inserimento dei bottoni nell'asola tramite ausilio.**



**Figura 8. Anello per afferraggio della cerniera.**



**Figura 9. Camicia con chiusura a velcro.**

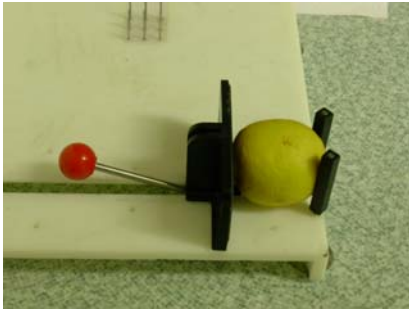
## 2.2.3 Attività generiche

Sono elencati alcuni oggetti che possono essere di aiuto per il portatore di protesi nello svolgere generiche attività di vita quotidiana.

- Tagliere con dispositivi per il bloccaggio del cibo (Figura 10);
- Forbici con ritorno elastico (Figura 11);
- Pinzette per la manipolazione fine (Figura 12);
- Prolunga per afferrare oggetti a distanza (Figura 13);
- Puntatrice con basamento;
- Posate con manico ingrossato e ricurvo;



- Sfogliatore per libri e riviste;
- Puntatore per tastiera;
- Trackball.



**Figura 10.** Tagliere con dispositivi per il bloccaggio del cibo.



**Figura 11.** Forbici con ritorno elastico.



**Figura 12.** Pinzette per la manipolazione fine.



**Figura 13.** Prolunga per afferrare oggetti a distanza.

## **2.3 Definizione dei compiti**

Per definire i compiti occorre determinare la modalità di esecuzione più appropriata per ciascuna azione. Si può ritenere che le possibili linee generali da seguire nel procedimento siano comprese fra i seguenti orientamenti estremi:

- compiti eseguiti nel modo più semplice possibile per un amputato, considerando i limiti attuali delle protesi a controllo mioelettrico e tutte le facilitazioni, fra cui quelle derivanti dall'attuazione di strategie alternative, movimenti compensatori e impiego di ausili;
- compiti eseguiti in maniera fisiologica, ovvero nel modo più naturale possibile per un normodotato, senza considerare alcun tipo di facilitazione.

Il criterio generale per questa definizione deve fare riferimento, come accennato in precedenza, allo scopo finale che si vuole perseguire. Tale scopo consiste nel determinare nuove linee guida per la progettazione di protesi d'arto superiore, e in particolare di nuove articolazioni attuate (specialmente per la spalla, quindi per amputati bilaterali con alto livello di amputazione). Si vuole quindi definire un insieme di compiti che siano idonei a valutare le prestazioni funzionali di una protesi d'arto superiore.

Questo presupposto orienta verso il secondo estremo: l'esecuzione fisiologica. A supporto di ciò valgono le seguenti considerazioni:

- le traiettorie della mano ottenute dall'esecuzione dei compiti devono essere valide indipendentemente dall'architettura del robot che si sta considerando, dal momento che differenti architetture devono essere confrontate sui medesimi compiti; questo implica che occorre prescindere dal livello di amputazione, dalla disposizione dei giunti sulla protesi e dalle tecniche di compensazione e controllo che potrebbero in ciascun caso essere attuate;
- non è possibile definire con precisione l'innovazione che potrà essere apportata nel futuro da nuove tecnologie: queste potrebbero radicalmente modificare le strategie di controllo ed esecuzione attualmente impiegate, rendendo possibile ad esempio un movimento più simile a quello fisiologico e migliorando le capacità di presa della mano artificiale.

Risulta tuttavia opportuno moderare questa linea per le ragioni seguenti:

- nell'algoritmo della DOPA vengono impiegati dei parametri arbitrariamente scelti; occorre una taratura di tali parametri e una validazione dei risultati ottenuti; questo può essere conseguito solamente tramite il confronto con gli attuali criteri di scelta e i risultati ottenuti dai tecnici ortopedici, responsabili della scelta della protesi idonea per ogni amputato;
- ragionevolmente per svariati anni resterà diffuso l'impiego delle attuali protesi mioelettriche di mano; queste presentano la notevole limitazione di poter usufruire solamente di un grado di libertà per la presa, che avviene a pinza;
- è opportuno non penalizzare eccessivamente architetture semplici (e quindi più comode e leggere) che con qualche accorgimento potrebbero risultare efficienti.

La linea scelta, che pondera al meglio le esigenze sottolineate, è di adottare gli *accorgimenti minimi necessari perché l'esecuzione dei compiti risulti ragionevolmente comoda per il paziente*. Tale affermazione significa, in concreto, che se il movimento fisiologico risulta particolarmente complesso ed esistono ausili, strategie alternative o movimenti compensatori facilmente impiegabili e che semplificano notevolmente l'esecuzione del compito, questi accorgimenti verranno adottati. A maggior ragione si impiegheranno questi accorgimenti nei compiti classificati nella DOPA come "ad alta priorità": essi rivestono infatti un peso rilevante anche con richieste di bassa funzionalità da parte del paziente.

Ad esempio per l'igiene intima perineale, che riveste grandissima importanza per l'autonomia della persona ed è considerato un compito avente priorità massima, si è contemplato l'impiego della spugna con prolunga mostrata al centro della Figura 3. Non usare questo ausilio implicherebbe dei requisiti eccessivi per le architetture protesiche, soprattutto in termini di escursioni articolari, che sarebbero richiesti praticamente solo in questo caso. Non avrebbe senso giungere alla conclusione che molte protesi non permettono di eseguire tale compito, dal momento che questo è reso possibile dall'utilizzo di un semplice ausilio.

Concludendo, in generale si è deciso di adottare un approccio che consideri:

- esecuzione fisiologica del compito;
- impiego di ausili, strategie alternative e movimenti compensatori solo in casi limitati e per i compiti appartenenti alle classi a più alta priorità; in particolare gli ausili considerati per alcuni compiti specifici sono stati:
  - forbici con ritorno elastico per "fissare foglio e tagliarlo";
  - prolunga con spugna per "igiene intima perineale";
  - strumento per l'inserimento dei bottoni nell'asola per "bottoni camicia";
- postura e posizionamento iniziale comodi per il soggetto; in particolare si sono definite come standard le seguenti posizioni:
  - soggetto seduto con gambe a squadro poggiate a terra, busto eretto, braccio parallelo al tronco (direzione verticale sul piano sagittale), avambraccio flesso in modo che sia appoggiato sul tavolo per la metà della sua lunghezza (mano prona), sul piano

- sagittale passante per la spalla; la distanza della sedia dal tavolo è quella che il soggetto ritiene più naturale;
- soggetto in piedi di fronte al ripiano di riferimento (se presente) con le braccia distese lungo il corpo;
- collocazione degli oggetti tale da renderli facilmente raggiungibili e afferrabili; per i dettagli si veda l'Appendice B.1;
- utilizzo di mani mioelettriche o di mani che si comportino come tali, cioè con riduzione dell'abilità digitale.

## 3 Metodo per l'ottenimento delle traiettorie di riferimento

### 3.1 Scelta del metodo: Analisi del Movimento

I possibili metodi per ottenere le traiettorie di riferimento dei compiti possono essere suddivisi in tre tipologie:

- individuazione in letteratura di opportuni database contenenti le informazioni necessarie;
- acquisizione diretta delle traiettorie con l'impiego di una tecnica basata sull'Analisi del Movimento;
- utilizzo di un sistema software che consenta la determinazione delle traiettorie tramite la simulazione dei compiti.

In letteratura possono essere rintracciati numerosi lavori contenenti indicazioni e misure sullo svolgimento di ADL [4]. Se in alcuni casi viene considerata l'articolazione del polso [5][7][9][12][16], tuttavia molto raramente viene presentata la posa della mano [12]. In questi ultimi casi risulta comunque assai ridotto il numero di compiti analizzati. Inoltre generalmente gli studi si riferiscono solamente alla determinazione dell'ampiezza di movimento delle articolazioni. A ciò si aggiunge che non esistono compiti definiti secondo le specifiche esposte nel paragrafo 2.3. Per questi motivi si è dovuto prevedere l'impiego di un altro metodo per ottenere le traiettorie di riferimento.

La Tabella 1 riassume gli elementi contrari e favorevoli alla scelta di una fra le altre due metodologie.

Si sono considerati come elementi di maggior peso l'ottenimento di risultati attendibili e l'impiego del minore tempo possibile. È stato inoltre messo a disposizione dal Centro Protesi INAIL un idoneo laboratorio per l'Analisi del Movimento. Tali fattori hanno orientato la scelta verso l'utilizzo di una tecnica basata sull'Analisi del Movimento.

**Tabella 1. Confronto tra due possibili metodologie di ottenimento delle traiettorie: Analisi del Movimento e un generico simulatore software.**

	Analisi del Movimento	Simulatore software
pro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tempi rapidi nella generazione delle traiettorie</li> <li>• realismo delle acquisizioni</li> <li>• maggiore attendibilità dei risultati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• disponibilità continua del sistema</li> <li>• possibilità di modificare le traiettorie in ogni momento</li> <li>• semplicità e univocità delle traiettorie</li> </ul>
contro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tempi lunghi nell'elaborazione dei dati</li> <li>• difficoltà nel ripetere e modificare le acquisizioni</li> <li>• difficoltà nel reperimento di oggetti ed ambienti reali</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• difficoltà nell'ideazione delle traiettorie</li> <li>• reperimento del software</li> <li>• adeguamento del software alle esigenze specifiche</li> </ul>

### **3.2 Strumenti impiegati**

Per l'acquisizione delle traiettorie di riferimento dei compiti è stato impiegato il sistema optoelettronico per l'analisi del movimento denominato Vicon 460, che nel caso specifico usufruisce di sei telecamere a raggi infrarossi, atte alla localizzazione spaziale di marcatori sferici catarifrangenti applicati al corpo del soggetto

### **3.3 Acquisizione delle traiettorie di riferimento**

I compiti acquisiti sono stati eseguiti da un soggetto sano, di 27 anni e alto 173 cm. Si è scelto di non effettuare le acquisizioni su più soggetti, poiché è possibile che soggetti diversi adottino diverse strategie di esecuzione per la stessa azione: non è perciò garantito che la ricerca di un traiettoria “media” della mano offra risultati significativi. Si sono assunte invece come valide le traiettorie eseguite da un solo soggetto normodotato, sicuramente idonee a portare a termine i compiti, anche se ovviamente non le uniche possibili. Sono stati eseguiti 59 compiti, ognuno dei quali ripetuto tre volte. Delle ripetizioni si è considerata solo l'esecuzione che presentava una migliore visibilità dei marcatori e fluidità di movimento. I compiti che prevedevano l'impiego di strategie alternative e movimenti compensatori sono stati compiuti anche in maniera fisiologica. Sono state acquisite le traiettorie di entrambe le mani, dal momento che molte azioni prevedevano l'utilizzo di ambedue. Per i motivi che saranno espressi nel paragrafo 4.1, si sono infine individuate le posizioni relative di alcuni punti notevoli sulla mano destra del soggetto sano e su una mano mioelettrica di dimensioni simili.

#### **3.3.1 Posizionamento dei marcatori**

Il sistema Vicon impiegato identifica la posizione di marcatori sferici catarifrangenti rispetto a un sistema di riferimento solidale con l'ambiente del laboratorio. Per determinare la posizione di un corpo rigido nello spazio, in questo caso la posizione di un segmento corporeo, occorrono quindi tre marcatori applicati a tale corpo.

Volendo riferire la posizione delle mani al torace (che verrà considerato come telaio del “manipolatore braccio”), e introducendo l’ approssimazione di assumere come corpi rigidi la mano (vedi capitolo 4) e il torace, il numero minimo di marcatori da utilizzare sarebbe di nove. Tuttavia i marcatori su ciascun membro sono portati a quattro. In questo modo si ovvia all’ accidentale oscuramento di un marcatore durante l’ acquisizione, rendendo così più robusto il sistema.

Si è inoltre deciso di aggiungere marcatori su:

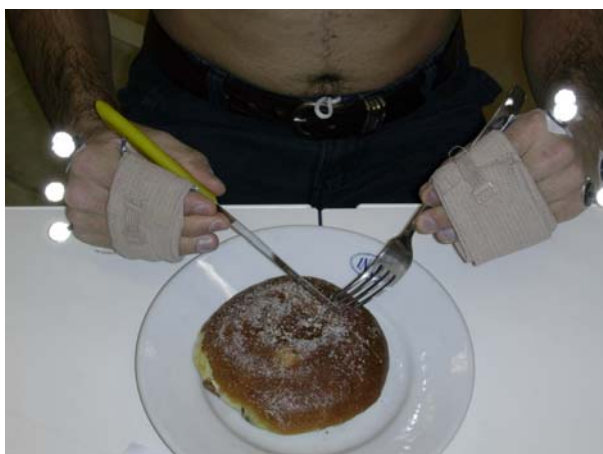
- testa: per monitorare i movimenti di quest’ ultima nella strategia motoria generale per l’ esecuzione delle attività;
- gomiti e acromion: per visualizzare la configurazione dell’ arto superiore;
- terra ed eventuale piano di riferimento (es. tavolo): per identificare la posizione del soggetto nell’ ambiente e la sua interazione con esso;
- eventuale oggetto impiegato: per identificare il suo spostamento e in particolare il momento in cui viene afferrato.

Per la descrizione completa dei marcatori utilizzati si veda l’ Appendice B.2.

### 3.3.2 Prove statiche

Per la determinazione della posizione relativa dei segmenti anatomici (es. mano) rispetto ai marcatori applicati al segmento stesso, si sono eseguite le cosiddette *prove statiche*. Per realizzare tali prove si è utilizzata una bacchetta di dimensione nota avente due marcatori applicati in posizioni conosciute. Con un solo fotogramma di un’ acquisizione in cui la bacchetta è appoggiata con un suo estremo al punto del quale si vuole identificare la posizione, è possibile risalire alla posizione relativa del punto stesso. Nelle acquisizioni successive, senza la necessità di utilizzare la bacchetta, sarà così possibile determinare i punti notevoli individuati rispetto ai marcatori, e da questi ottenere la posa del segmento corporeo, identificata da tali punti notevoli.

### 3.3.3 Utilizzo delle mani



**Figure 14 e 15. Imitazione della posizione di afferraggio del coltello normalmente utilizzata con mano mioelettrica.**

Si è detto nel paragrafo 2.3 che la mano deve essere utilizzata replicando le attuali capacità e modalità di impiego della mano mioelettrica. Poiché i compiti sono stati eseguiti da un soggetto sano, si è ritenuto opportuno adottare alcuni accorgimenti che permettessero di rispondere a questo requisito. Si è quindi deciso di bendare le dita in modo da limitarne il movimento e le capacità di

manipolazione. Si è inoltre utilizzato il pollice solamente chiudendolo verso la punta dell'indice e del medio, afferrando gli oggetti così come osservato sui portatori di protesi.

Il coltello, ad esempio, viene afferrato con presa a pinza e fatto poggiare sull'incavo della mano (Figure 14 e 15).

### 3.4 **Acquisizione dei movimenti del cingolo scapolare e del collo**

Oltre che per individuare le traiettorie di riferimento si è utilizzato il sistema Vicon per determinare anche le ampiezze di movimento (dette *ROM – Range Of Motion*) di collo e cingolo scapolare. Come verrà descritto nel paragrafo 4.4, esse forniscono un'indicazione sull'ampiezza possibile per i movimenti compensatori, e quindi per gli errori ammissibili consentiti per i compiti. Durante ogni acquisizione il movimento è stato ripetuto tre volte, ogni volta fino al limite consentito dall'articolazione. Le acquisizioni sono state suddivise in:

collo:

- circonduzione;
- rotazione intorno asse x (asse orizzontale nel piano frontale);
- rotazione intorno asse y (asse verticale);
- rotazione intorno asse z (asse orizzontale nel piano sagittale);
- traslazione lungo z;

cingolo scapolare:

- anteposizione e retroposizione;
- elevazione e abbassamento.

Durante queste acquisizioni si sono utilizzati, oltre ai precedenti, quattro marcatori per l'omero e quattro per l'avambraccio.

## 3.5 **Risultati**

### 3.5.1 **Traiettorie di riferimento**

Dopo una prima elaborazione dei dati, descritta in Appendice C.1, si sono ottenute le traiettorie dei marcatori e dei punti notevoli determinati nelle prove statiche nel sistema di riferimento assoluto solidale con l'ambiente, cioè il laboratorio (Appendice C.2).

In Tabella 2 sono presentati i compiti acquisiti con i rispettivi accorgimenti adottati per quanto riguarda strategie alternative, movimenti compensatori e impiego di ausili.

**Tabella 2. Elenco dei compiti acquisiti. I compiti terminanti con l'indicazione BIS sono stati eseguiti adottando accorgimenti tali da semplificare il movimento della protesi.**

	NOME COMPITI	STRATEGIE ALTERNATIVE, AUSILI E MOVIMENTI COMPENSATORI
1	Afferraggio oggetto sul bordo	
2	Allacciare zip pantaloni	Ausilio: anello sulla cerniera.
3	Aprire bustina zucchero	Strategia alternativa: uso di testa e denti.
4	Aprire custodia cd	
5	Aprire e chiudere maniglia finestra	
6	Aprire e chiudere rubinetto a leva	

7	Aprire e chiudere rubinetto	
8	Aprire e chiudere rubinetto BIS	Movimenti compensatori: movimenti del corpo.
9	Banconote da portafoglio	
10	Bere da bicchiere	
11	Bere da bicchiere BIS	Movimenti compensatori: abbassamento testa e innalzamento spalla.
12	Bottoni camicia	Ausilio: strumento per l'inserimento dei bottoni.
13	Cancellare con gomma	
14	Chiudere e aprire zip giubbotto	
15	Cucinare su fornello	
16	Estrarre cd da custodia	
17	Fissare foglio e tagliarlo	
18	Igiene perineale	Ausilio: spugna con prolunga.
19	Igiene pubica	
20	Indossare calzini	
21	Indossare e togliere mutande	
22	Indossare pantaloni	
23	lavare viso con spugna	
24	lavare viso con spugna BIS	Movimenti compensatori: abbassamento testa e innalzamento spalla.
25	lavarsi il torso	
26	lavatrice	
27	Mangiare con cucchiaio	
28	Mangiare con cucchiaio BIS	Movimenti compensatori: abbassamento testa e innalzamento spalla.
29	Mangiare con forchetta	
30	Mangiare con forchetta BIS	Movimenti compensatori: abbassamento testa e innalzamento spalla.
31	Mangiare con le mani	
32	Maniglia bimanuale finestra	
33	Maniglia porta	
34	Monete da un piano	
35	Pettinarsi	
36	Pettinarsi BIS	Movimenti compensatori: movimenti della testa.
37	Ripiano alto	
38	Ripiano basso	
39	Ripiano medio	
40	Riporre oggetti nel carrello	
41	Sapone su spugna	
42	Scrivere	
43	Sfogliare libro	
44	Spalmare dentifricio	
45	Spalmare dentifricio BIS	Ausilio: dispenser a pulsante per il dentifricio.
46	Spalmare salsa su pane	
47	Stappare tappo	
48	Stendere su stendiabiti	
49	Stirare	
50	Tagliare cibo con coltello	
51	Tastiera	
52	Uso bilancia	
53	Uso saliera	
54	Uso saliera BIS	Movimenti compensatori: movimenti del corpo.
55	Uso spazzolino	
56	Uso telefono cellulare	
57	Uso telefono fisso	
58	Uso telefono fisso BIS	Strategia alternativa: utilizzo della sola mano destra.
59	Versare da bottiglia a bicchiere	

### 3.5.2 Ampiezza di movimento del cingolo scapolare

I valori del ROM sono stati impiegati come indicazione per la definizione degli errori ammissibili (vedi paragrafo 4.4). In prima approssimazione, solamente i valori di ampiezza del movimento del cingolo scapolare sono stati considerati, in quanto ritenuti più significativi. I movimenti di compensazione del collo, infatti, sono da valutare solamente nel caso si voglia portare la mano alla testa o in prossimità di essa.

Il ROM del cingolo scapolare, misurato rispetto alla posizione di riposo, è risultato essere:

- anteposizione: 68 mm;
- retroposizione: 52 mm;
- elevazione: 97 mm;
- abbassamento: 11 mm.

## 4 Definizione delle traiettorie di riferimento

Le traiettorie di riferimento, essendo eseguite da un soggetto normodotato, devono rappresentare l'esecuzione "normale" o "corretta" di un compito. Tali traiettorie, quindi, devono fornire un'informazione sul movimento e atteggiamento necessario alle mani per portare a compimento una determinata azione. L'analisi finora attuata in letteratura ha generalmente focalizzato l'attenzione, più che sui requisiti delle mani, sulle specifiche richieste alle articolazioni, in particolare sulle ampiezze di rotazione. Dai risultati presentati nei lavori svolti è quindi possibile solo in pochi casi e solo per alcuni compiti ricostruire la traiettoria compiuta dalle mani [4][12]. Infatti essa è presentata usualmente in coordinate nello spazio dei giunti senza l'indicazione della lunghezza dei membri, risultando pertanto impossibile l'esecuzione di un'analisi cinematica inversa necessaria alla ricostruzione della traiettoria della mano espressa nello Spazio Cartesiano.

Si è taciuto finora il fatto che per parlare di traiettoria di una mano occorre identificarla come un corpo rigido. Una mano sana, in realtà, può essere descritta da un meccanismo con ben 16 gradi di libertà. Tali gradi di libertà, presenti nelle articolazioni delle dita, risultano decisivi per la riuscita di un compito [15], permettendo alla mano numerose modalità di presa e azioni di manipolazione fine. Possono essere fatte tuttavia alcune considerazioni. Per i motivi indicati nel paragrafo 2.3, si è scelto di considerare che i compiti vengano eseguiti da mani mioelettriche o da mani che si comportino analogamente (vedi paragrafo 3.3.3). Tali mani presentano un unico grado di libertà per la presa, che avviene con modalità "a pinza" fra i polpastrelli di pollice, indice e medio (presa tridigitale). Si consideri quindi la mano mioelettrica. Essa è costituita da un supporto rigido, collocato nel palmo, e da un meccanismo a pinza, atto a muovere medio, indice e pollice. Una volta definita la posa del supporto nello spazio risulta completamente definita anche l'attività che la mano può eseguire, in quanto risultano definite le traiettorie percorribili dai polpastrelli di pollice, indice e medio. Tali traiettorie sono solidali al supporto e correlate tra loro (identificata la posizione di uno dei polpastrelli sono identificate anche le altre due). In particolare è determinata e solidale al supporto la posizione del *punto di presa*, definito come il punto medio dei contatti indice-pollice e medio-pollice quando la mano è chiusa. In conclusione per traiettoria della mano si può intendere quindi, come verrà fatto d'ora in avanti, la traiettoria del corpo rigido supporto. Allo stesso modo si intenderà per posa, posizione e orientamento della mano rispettivamente la posa, la posizione e l'orientamento del supporto. Tale definizione può essere estesa anche alla mano sana, se utilizzata come fosse una mano mioelettrica secondo i criteri espressi nel paragrafo 3.3.3. Il supporto in questo caso è la struttura costituita dalle ossa di carpo e metacarpo, che ai fini del nostro studio possono essere considerate rigidamente connesse, in quanto i movimenti relativi possibili fra le ossa



sono assai limitati. In entrambi i casi il punto di presa è solidale al supporto, e quindi è un punto appartenente al “corpo rigido mano” di cui si definisce la traiettoria.

Resta da verificare, come verrà descritto nel paragrafo 4.1, la legittimità della sostituzione della mano mioelettrica, impiegata per i modelli delle architetture protesiche e della quale devono essere definite le traiettorie di riferimento, con la mano sana del soggetto con il quale sono stati effettivamente acquisiti i compiti. In particolare dovrà essere rispettata una congruenza di forma, dimensioni e postura fra le due tipologie di mani, al fine di rispettare l’analogia richiesta. Se la congruenza è soddisfatta non occorrerà più distinguere le due diverse mani.

Verificato questo, si può assumere che l’esecuzione di un compito sia completamente definita da una sequenza di pose della mano, che rappresentano i passaggi obbligati per l’esecuzione di un’azione. In altre parole se una generica architettura è in grado di far assumere alla mano la determinata sequenza di pose che individuano un compito allora tale architettura è idonea a svolgere quel compito. I punti notevoli della traiettoria della mano in cui la posa della stessa risulta rilevante verranno denominati *nodi*. Questi punti, il cui numero è molto ridotto rispetto ai punti che definiscono la traiettoria, dovranno essere opportunamente determinati. Nel paragrafo 4.2 verrà descritta la modalità con cui la posa della mano è rappresentata nello spazio, mentre nel paragrafo 4.3 sarà riportata la strategia con cui sono stati identificati i nodi.

Come visto nel capitolo 2, si può tuttavia affermare che non esista una traiettoria “esatta” delle mani in grado di definire un compito in modo assoluto. Ci sono invece numerose modalità possibili e margini di adattabilità, pur rimanendo in un ambito di “normalità”: per esempio una spugna può essere afferrata in diversi punti e con diversi orientamenti della mano, senza per questo pregiudicare lo svolgimento dell’azione. Tuttavia, per poter eseguire un determinato compito, occorrerà che la traiettoria della mano non si scosti in modo eccessivo dalla sequenza di pose considerate rappresentative del compito, pena l’incapacità a svolgere il compito. Si può quindi concludere che per portare a termine un compito la posizione e l’orientamento della mano debbano assumere certi valori all’interno di un intervallo in cui la posa della stessa può essere considerata accettabile. I limiti di tale intervallo saranno denominati *errori ammissibili*. La definizione di tali errori è descritta nel paragrafo 4.4.

#### **4.1 Verifica di congruenza tra mano sana dell’acquisizione e mano mioelettrica del modello di architettura protesica**

Si è detto che i compiti, compiuti da un soggetto sano, sono stati considerati nelle traiettorie di riferimento come se fossero stati realizzati con mani mioelettriche. Si è supposto quindi che il soggetto che esegue l’azione abbia mani con forma, dimensioni e postura di una mano mioelettrica reperibile sul mercato. Ciò implica l’assunzione, che deve essere verificata, che vi sia una congruenza dimensionale e di forma fra la mano del soggetto sano sottoposto all’Analisi del Movimento e la mano mioelettrica di taglia corrispondente inserita nel modello di protesi. Nella definizione delle traiettorie di riferimento, infatti, punti notevoli determinati sulla mano sana saranno sostituiti dai punti notevoli omologhi della mano mioelettrica, ovvero le due mani si devono idealmente “sovrapporre”.

Per eseguire la verifica si sono selezionati quindi alcuni punti notevoli, considerati rappresentativi e individuabili su entrambe le mani, e si è cercato di sovrapporli nel modo migliore possibile per mezzo di movimenti rigidi delle due mani. Si è infine valutata la distanza rimanente fra i punti omologhi, che nel caso di perfetta congruenza avrebbe dovuto risultare nulla per tutti i punti.

In Figura 16 e Figura 17 sono schematizzati i passi che sono stati attuati per la verifica. Viene mostrato per semplicità un esempio bidimensionale.

*Passo 1.* Nel riferimento assoluto del laboratorio si individuano su entrambe le mani alcuni punti notevoli per i quali si vuole ottenere la sovrapposizione migliore possibile (siano ad esempio i punti A, B, C e D di Figura 16).

*Passo 2.* Per ogni mano si definisce in base ad alcuni di questi punti notevoli un sistema di riferimento solidale alla mano stessa, per esempio:

- $\Sigma_s$  per la mano sana, definito in base alle posizioni di  $A_s$  e  $C_s$ ;
- $\Sigma_m$  per la mano mioelettrica, definito in base alle posizioni di  $A_m$  e  $C_m$ .

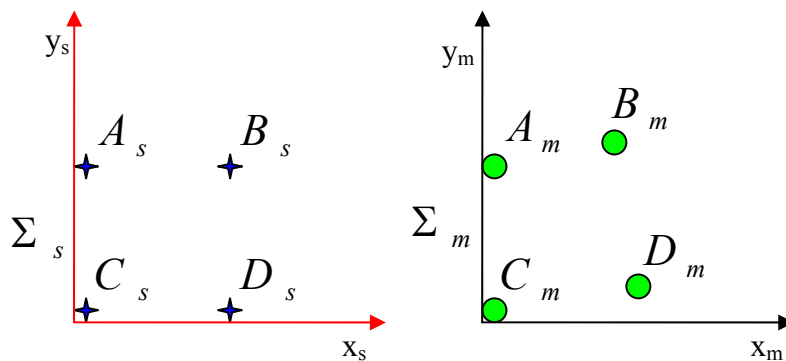
*Passo 3.* Si traslano rigidamente i punti della mano mioelettrica in modo da portare a coincidere i due sistemi di riferimento solidali alle mani,  $\Sigma_s$  e  $\Sigma_m$ .

*Passo 4.* Si determina una matrice di rotazione R che ruoti il sistema  $\Sigma_m$  in modo da minimizzare la somma dei quadrati delle distanze fra i punti omologhi. Ovvero si determina R in modo tale che

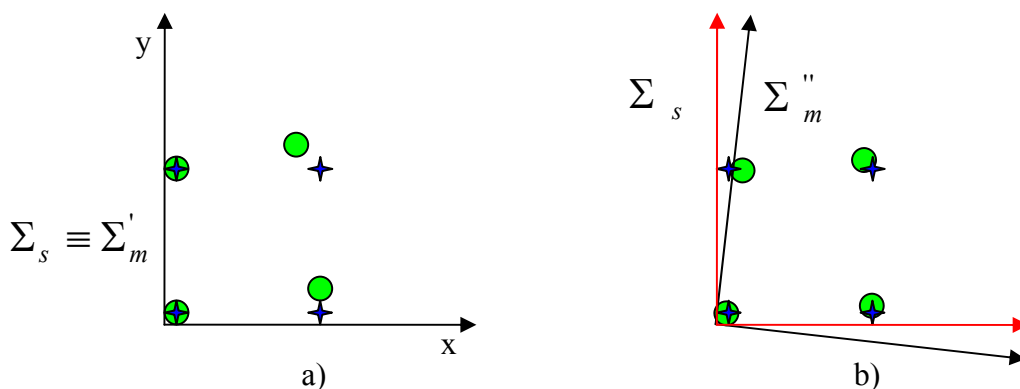
$$\Sigma_m'' = R \cdot \Sigma_m'$$

$\Sigma_m''$  deve essere posizionato in modo tale da rendere minima la funzione

$$\phi = |\bar{A}_s - \bar{A}_m|^2 + |\bar{B}_s - \bar{B}_m|^2 + |\bar{C}_s - \bar{C}_m|^2 + |\bar{D}_s - \bar{D}_m|^2.$$



**Figura 16.** Passi 1 e 2: individuazione dei punti notevoli e dei sistemi di riferimento solidali alle mani sana (pedice s) e mioelettrica (pedice m).



**Figura 17 a) e b).** Passi 3 e 4: posizionamento del sistema di riferimento solidale alla mano mioelettrica in modo da minimizzare la somma dei quadrati delle distanze fra i punti omologhi.

I medesimi passi, applicati al caso in esame, sono stati i seguenti.

*Passo 1.* I punti notevoli considerati (indicati in Figura 18 e Figura 19) sono stati identificati in sede di acquisizione attraverso le cosiddette prove statiche. Essi sono:

- il punto di presa  $P_1$  (per l'importanza nel definire l'azione della mano);
- le quattro nocche, indicate con M2, M3, M4 ed M5 (per la facilità di identificazione e l'affidabilità con cui rappresentano il telaio della mano, in particolare della mano sana che non è perfettamente rigida);
- il centro del polso CP (per la rilevanza nel definire le dimensioni della mano e l'orientamento di quest'ultima rispetto al punto di presa).

*Passo 2.* Nel riferimento assoluto del laboratorio si sono definiti i sistemi di riferimento solidali con le mani,  $\Sigma_s$  per la mano sana e  $\Sigma_m$  per la mano mioelettrica, calcolati nello stesso modo:

- asse y: parallelo alla retta passante per M2 ed M5;
- asse z: parallelo alla retta passante per  $P_1$  e il punto medio di M2 ed M3;
- asse x: tale da formare una terna cartesiana con gli altri due;
- origine: nel punto  $P_1$ .

Si sono quindi riferiti i punti notevoli di ciascuna mano al rispettivo sistema di riferimento.

*Passo 3.* Si sono sovrapposti i sistemi  $\Sigma_s$  e  $\Sigma_m$ .

*Passo 4.* Si è cercata una matrice  $\mathbf{R}$  di rotazione che ruotasse il sistema  $\Sigma_m$  in modo da minimizzare la somma dei quadrati delle distanze fra i punti notevoli omologhi (escluso  $P_1^s$  e  $P_1^m$ , già sovrapposti perché origine comune dei due sistemi). La matrice  $\mathbf{R}$  ottenuta è risultata essere:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9992 & -0.0204 & 0.0342 \\ 0.0164 & 0.9934 & 0.1134 \\ -0.0363 & -0.1127 & 0.9930 \end{bmatrix}.$$

Si è considerata la configurazione dei punti notevoli omologhi al termine del procedimento come la condizione di "sovrapposizione ottima" delle due mani.

La matrice di rotazione  $\mathbf{R}$  verrà impiegata (vedi paragrafo 4.2) per posizionare correttamente i punti della mano del modello di architettura protesica (mano mioelettrica della simulazione) rispetto ai punti della mano sana (mano dell'acquisizione). Infatti il sistema di riferimento della mano mioelettrica (determinato in base ai punti di questa), affinché i punti delle due mani si sovrappongano al meglio, dovrà prima essere ruotato secondo  $\mathbf{R}$ , e poi sovrapposto al sistema analogamente determinato per la mano sana.

In corrispondenza della sovrapposizione così ottenuta, mostrata in Figura 18, si sono calcolate le distanze residue fra i punti notevoli omologhi, le quali rappresentano la differenza di forma e dimensioni delle due mani. Esse forniscono un'indicazione sull'errore commesso nel sostituire la mano mioelettrica con quella sana. Le distanze sono risultate essere:

- $P_1$ : 0 mm;
- M2: 12,3 mm;
- M3: 12,8 mm;
- M4: 10,3 mm;
- M5: 11,6 mm;
- CP: 9,5 mm.

Ai fini di questo studio commettere tali errori (in assoluto piuttosto alti) non comporta una significativa modifica della modalità di esecuzione di un dato compito, e si è perciò ritenuta accettabile una sovrapposizione ideale delle due mani.

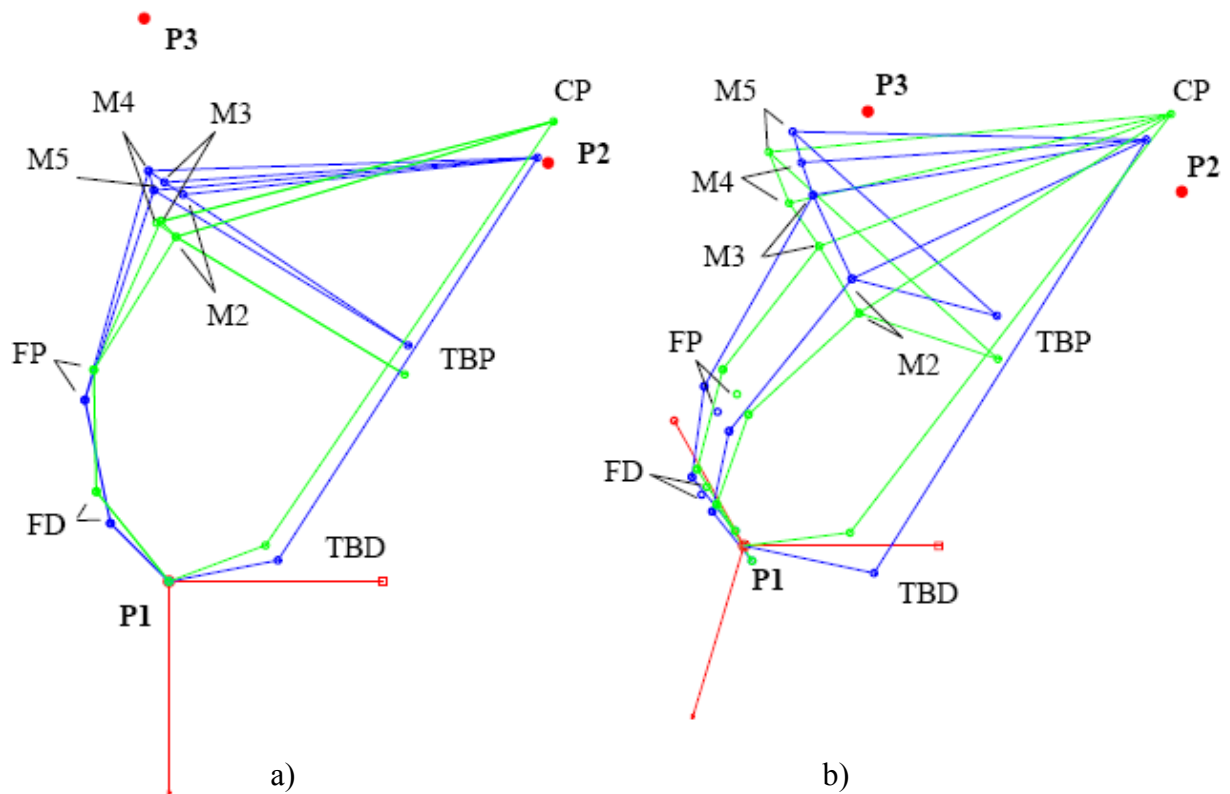


Figura 18 a) e b). Due viste della sovrapposizione ottima della mano mioelettrica (verde) e della mano sana (blu). In rosso sono evidenziati i tre punti ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ) deputati all'individuazione della posa della mano nello spazio. Sono indicati anche i punti notevoli utilizzati per la rappresentazione delle mani.

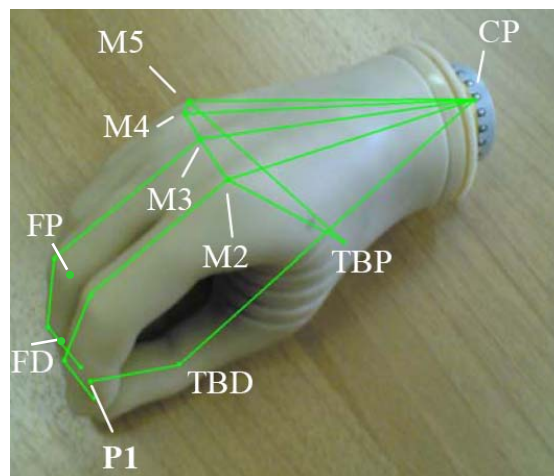


Figura 19. Visualizzazione dei punti notevoli individuati sulla mano mioelettrica.

## 4.2 Descrizione di posizione e orientamento della mano nello spazio

Per definire la posa della mano come corpo rigido nello spazio occorrono almeno sei parametri (tre per la posizione e tre per l'orientamento). Una soluzione possibile è quella di definire la posa di un sistema di riferimento solidale alla mano, individuato dalla sua origine e ad esempio da una terna di angoli di Eulero. Si avrebbe quindi una descrizione della posa con tre coordinate cartesiane per la posizione dell'origine e tre angoli per l'orientamento della terna. Nel contesto della DOPA, utilizzare una simile descrizione significa che occorrerebbe stabilire in ogni istante di interesse quali sono le coordinate dell'origine e quali gli angoli a cui la terna della mano deve avvicinarsi. Tale impostazione risulta però di scarsa efficacia sia grafica che computazionale: per minimizzare le distanze fra i punti della mano individuati nella traiettoria di riferimento e quelli dell'organo terminale del robot che la deve compiere, viene impiegato infatti un metodo non lineare ai minimi quadrati, basato sulla minimizzazione di una funzione costo scalare. Utilizzando come parametri le coordinate dell'origine del sistema di riferimento e gli angoli di Eulero, la funzione da minimizzare includerebbe termini non omogenei. Tali termini sarebbero sensibili a fattori di scala, e, di fatto, non avrebbe senso sommare angoli e distanze, come richiederebbe il calcolo della funzione. Oltretutto i tre angoli rappresentanti l'orientamento dipenderebbero dalla successione delle rotazioni elementari a cui corrispondono, e questo creerebbe problemi nella definizione degli errori di orientamento.

A causa di queste ragioni si è quindi scelta una soluzione alternativa, basata sull'uso delle coordinate naturali. Tale tecnica, che fa uso di coordinate di punti solidali al corpo rigido nella determinazione della sua posa, è stata proposta in [13] [14] per la sintesi di meccanismi. Essa risulta particolarmente valida nel caso in esame per la sua semplicità ed efficacia computazionale. La posa della mano nello spazio viene quindi identificata dalla posizione di tre punti solidali con essa, utilizzando in questo modo nove parametri (tre coordinate per ogni punto) di cui solo sei indipendenti.

I tre punti sono stati scelti in modo tale da offrire una immediata visualizzazione della posa della mano e una facile valutazione degli errori ammissibili.

Il primo punto individuato è stato il punto di presa ( $P_1$  in Figura 19). Poiché tale punto identifica il luogo su cui si chiudono le tre dita che eseguono la presa, esso individua anche la regione di spazio in cui generalmente vengono afferrati gli oggetti, risultando perciò un punto di notevole interesse.

Gli altri due punti sono stati scelti in modo da individuare insieme al punto di presa un piano notevole ( $\pi$ ), indicativamente un piano che in posizione di riposo (braccio disteso lungo il fianco e palmo rivolto verso l'interno) è parallelo al piano frontale e nel trasporto di un oggetto di cui si vuole mantenere verticale il proprio asse (per esempio un bicchiere pieno di liquido) è parallelo al piano orizzontale del terreno. Questo piano può essere identificato come il piano contenente la curva individuata dal contatto fra indice e medio nella posizione di presa, ovvero il piano contenente i punti  $P_1$ , FD ed FP (mostrati in Figura 18 e Figura 19).

Si sono quindi scelti i seguenti punti (visualizzati in Figura 18):

- $P_1$ : punto di presa.
- $P_2$ : si trova sulla proiezione del centro del polso sul piano  $\pi$ .
- $P_3$ : si trova sul piano  $\pi$ , alla stessa distanza di  $P_2$  da  $P_1$  e formante un angolo di 90 gradi con la congiungente  $P_1 P_2$  (dalla parte delle nocche rispetto alla retta passante per  $P_1 P_2$ ).

Affinché i tre punti siano esattamente gli stessi sia per la mano sana che per la mioelettrica, sono stati calcolati una sola volta sulla mano sana mentre le due mani erano in condizioni di "sovrapposizione ottimale", ovvero dopo la rotazione della mano mioelettrica operata per mezzo della matrice R (vedi paragrafo precedente), riportandone poi le coordinate nei sistemi di riferimento sovrapposti delle rispettive mani.

Concludendo, la traiettoria simulata della mano, costituita dalle traiettorie dei punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  appartenenti alla mano mioelettrica e quindi rigidamente connessi fra loro, dovrà al meglio approssimare la traiettoria di riferimento, definita dalle traiettorie che i medesimi punti individuati sulla mano sana hanno percorso nell'eseguire un dato compito. Il simulatore "approssimerà" la traiettoria di riferimento in quanto verranno considerati anche modelli di protesi con meno di sei gradi di libertà, che non saranno perciò in generale in grado di ripercorrere esattamente la traiettoria di riferimento.

Verranno d'ora in avanti identificati con l'apice  $r$  i punti notevoli della traiettoria di riferimento ( $P_1^r$ ,  $P_2^r$  e  $P_3^r$ ), e con l'apice  $s$  i medesimi punti della traiettoria simulata ( $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$ ). La mano individuata dai punti  $P_1^r$ ,  $P_2^r$  e  $P_3^r$  sarà detta *mano di riferimento*, quella indicata da  $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$  la *mano simulata*.

### 4.3 Individuazione dei nodi

Con il termine *nodi* si è voluto intendere quel particolare insieme di punti della traiettoria di riferimento che per la rilevanza della loro posizione possono da soli identificare un compito e individuare i passaggi essenziali per l'esecuzione di quel compito. Si potrebbe dire che sono i "passaggi obbligati", e saranno presi come riferimenti nella generazione della traiettoria simulata. Ad esempio per eseguire il compito "Mangiare con le mani" sarà indispensabile che il cibo venga afferrato e che successivamente venga portato alla bocca. I due punti in cui avvengono queste azioni possono essere identificati come nodi. Ovviamente, in particolare per compiti più complessi, i nodi presenti saranno un numero molto maggiore e occorrerà eventualmente considerare il tragitto da un punto a un altro: ad esempio per "Mettere oggetti nel carrello" (della spesa) bisogna superare l'ostacolo del carrello mentre si appoggiano gli oggetti al suo interno, invece per "Bere da bicchiere" occorre non rovesciare il bicchiere mentre lo si porta alla bocca, e quindi mantenere un orientamento costante della mano. Si può inoltre determinare una seconda classe di nodi, considerando quelli che contribuiscono a caratterizzare il compito pur non essendo di rilevanza prioritaria. In questo modo si hanno due categorie, che possiamo definire rispettivamente *nodi fondamentali* e *nodi generici*.

L'individuazione dei nodi riveste una particolare importanza per l'esecuzione della simulazione cinematica: i nodi sono i punti nei quali viene verificato il soddisfacimento delle condizioni imposte dagli errori ammissibili. Un'accurata individuazione e selezione dei nodi migliora le prestazioni della simulazione, riducendone il carico computazionale e rendendo meglio gestibile l'attribuzione degli errori ammissibili.

L'operazione di determinazione dei nodi risulterebbe tuttavia notevolmente laboriosa oltre che arbitraria. Si è perciò deciso di elaborare uno strumento in grado di estrarre una selezione di nodi autonomamente e secondo criteri ben determinati. Tale strumento software, programmato in Matlab®, elabora la traiettoria del punto di presa ( $P_1^r$ ) basandosi sul seguente principio: per definire una traiettoria occorre un maggior numero di punti dove questa ha un andamento più complesso. Questa complessità può essere identificata da un'analisi delle variazioni del suo raggio di curvatura. Oltretutto i nodi fondamentali si trovano tipicamente dove viene raggiunto un obiettivo, spesso il punto in cui si inverte la direzione di accostamento, ovvero dove si ha una brusca diminuzione del raggio di curvatura. Ad esempio il punto della traiettoria della mano in cui viene afferrato un bicchiere si trova in un punto dopo l'avvicinamento e prima dell'allontanamento della mano dal bicchiere, e facilmente la traiettoria di  $P_1^r$  presenterà una cuspide proprio nel punto di afferraggio. Si è perciò scelto di identificare come nodi i minimi relativi del raggio di curvatura della traiettoria del punto  $P_1^r$ .

I passi che portano a questo risultato sono di seguito elencati e successivamente descritti:

- “addolcimento” (*smoothing*) della traiettoria di riferimento;
- determinazione del raggio di curvatura in ciascun punto;
- determinazione dei minimi relativi del raggio di curvatura;
- riduzione del numero dei nodi.

#### 4.3.1 *Smoothing* della traiettoria

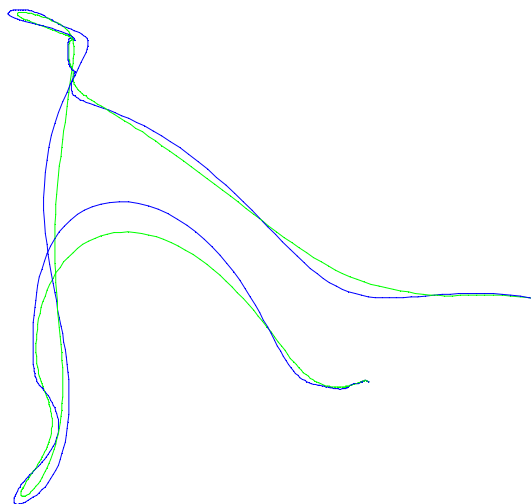
Per *smoothing* si intende il procedimento di addolcimento della traiettoria in modo da ridurne le asperità. Nel caso in questione lo *smoothing* è stato realizzato nel modo più semplice, ovvero tramite l’operazione di media mobile per ciascuna coordinata: al valore di ogni coordinata viene sostituito in ogni istante il valore medio della coordinata in un intervallo centrato nell’istante in esame.

Ad esempio, per la coordinata  $x$  si ha:

$$x_{P_1}(t) = \frac{\sum_{\tau=t-\lambda/2}^{t+\lambda/2} x_{P_1}(\tau)}{\lambda},$$

avendo indicato con  $t$  il fotogramma per il quale si vuole calcolare il nuovo valore della coordinata  $x$  di  $P_1^r$ , e con  $\lambda$  l’ampiezza dell’intervallo in numero di fotogrammi.

Questa operazione è stata eseguita perché non fossero riscontrati dei minimi del raggio di curvatura in punti in cui fossero solamente presenti asperità di piccola ampiezza (dovute all’origine sperimentale della traiettoria, per esempio causate da tremori o errori di misura) non rilevanti per la caratterizzazione della traiettoria. In Figura 20 è mostrato un esempio di applicazione dello *smoothing* per il compito “Mangiare con cucchiaio”.



**Figura 20** In blu è stata riportata la traiettoria del punto  $P_1^r$  nello spazio, per il compito “Mangiare con cucchiaio”. In verde la medesima traiettoria su cui è stato eseguito lo *smoothing*, con intervallo uguale a 30 fotogrammi.

### 4.3.2 Determinazione del raggio di curvatura della traiettoria

Per calcolare il raggio di curvatura si sono identificati per ogni istante tre punti sulla traiettoria, cioè tre posizioni occupate dal punto di presa P1<sup>r</sup>: il punto (A) per il quale si vuole calcolare il raggio, il punto (B) occupato cinque fotogrammi (0,05 s) dopo e quello (C) occupato cinque fotogrammi prima. B e C risultano quindi essere piuttosto prossimi ad A. Tre punti nello spazio individuano una circonferenza, il cui raggio è stato assunto come il raggio di curvatura della traiettoria per il punto in esame. Il centro di curvatura è ottenuto dall'intersezione delle perpendicolari nel punto medio di AB e di AC. Il raggio è evidentemente la distanza del centro da A. Il tutto si ricava dalla semplice soluzione dal seguente sistema lineare, in cui compaiono le due equazioni vettoriali:

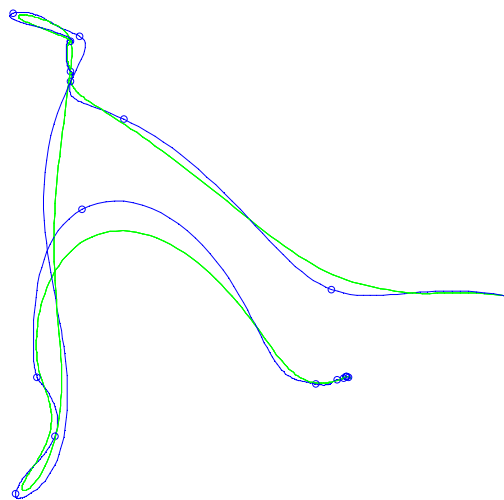
$$\begin{cases} \frac{\bar{A} + \bar{B}}{2} + k \cdot \bar{v}_a = \bar{O} \\ \frac{\bar{B} + \bar{C}}{2} + m \cdot \bar{v}_b = \bar{O} \end{cases},$$

avendo indicato con O il centro della circonferenza, con  $v_a$  e  $v_b$  i versori perpendicolari rispettivamente ai segmenti AB e BC, con k ed m le variabili da determinare, ovvero i parametri delle mediane di AB e BC.

### 4.3.3 Determinazione dei minimi relativi del raggio di curvatura

I minimi del raggio di curvatura, mostrati in Figura 21 per il compito “Mangiare con cucchiaio”, sono stati calcolati sulla traiettoria ottenuta dallo *smoothing*. Si è operato in tale modo perché non vengano identificati come minimi punti che non sono significativi e che sarebbero individuati solamente a causa di indesiderate asperità della traiettoria. Tuttavia il minimo viene così a trovarsi su una traiettoria modificata. Per ottenerne la posizione reale si sono prese perciò come coordinate del minimo le coordinate della traiettoria originaria nel fotogramma corrispondente al minimo della traiettoria modificata.

Per l'identificazione del minimo è bastato verificare che il valore del raggio di curvatura in quel punto fosse contemporaneamente minore del raggio nel fotogramma precedente e successivo.



**Figura 21. I punti indicati dai circoletti indicano i fotogrammi per i quali è stato individuato un minimo relativo del raggio di curvatura.**



#### 4.3.4 Riduzione del numero dei nodi

Osservando i risultati che si ottenevano dalla procedura contenente i soli tre passi precedenti si è notato che, nonostante lo *smoothing* iniziale, si presentava un infittimento eccessivo dei nodi in alcune zone in cui la traiettoria mostrava un andamento particolarmente complesso. Per ovviare a questo inconveniente si sarebbe potuto aumentare ulteriormente l'intervallo di fotogrammi su cui viene eseguita la media dei valori delle coordinate nello *smoothing*. Ciò avrebbe però significato una degenerazione non accettabile della forma della traiettoria con risultati non più significativi. Si è quindi scelto di individuare dei gruppi di minimi ravvicinati e di sostituire a questi il loro punto medio.

L'individuazione dei gruppi è stata realizzata in successione sia su base temporale che spaziale. Per quanto riguarda la "riduzione temporale" il raggruppamento individua i minimi che si trovano a meno di un certo numero di fotogrammi dal precedente. Analogamente il gruppo "spaziale" si basa sul calcolo della lunghezza del segmento che congiunge il minimo con il precedente.

Si noti come in Figura 22, dopo l'applicazione del procedimento di riduzione dei nodi per il compito "Mangiare con cucchiaio", non siano più presenti gli "agglomerati di minimi" che si possono individuare in Figura 21.

Si può osservare che il risultato di questa procedura dipende da un certo numero di parametri:

- intervallo di fotogrammi nello *smoothing* (*span*): è il numero di fotogrammi sul quale viene eseguita la media delle coordinate dei punti;
- intervallo di fotogrammi per la riduzione temporale (*time gap*): è il numero di fotogrammi che indica la distanza temporale massima per l'eliminazione di due minimi successivi e la sostituzione di questi col loro punto medio;
- intervallo di spazio (parametrizzato rispetto all'altezza) per la riduzione spaziale (*space gap*): è la distanza spaziale massima per cui due minimi successivi vengano eliminati e sostituiti col loro punto medio.

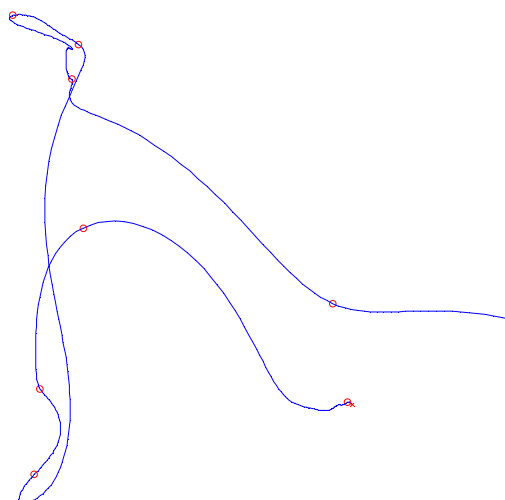
In effetti non si è trovato un unico set di parametri che desse risultati soddisfacenti per ogni compito: tarando i parametri per avere un numero opportuno di nodi nei compiti di manipolazione fine se ne ottenevano troppi per i compiti in cui era richiesta una minore precisione, e viceversa.

Si è quindi deciso di suddividere i compiti in tre classi in base alla precisione richiesta nell'esecuzione, determinando tre set di parametri, uno per ciascuna classe di precisione ( $C_p$ ). I valori dei parametri sono mostrati in Tabella 3.  $C_p = 1$  corrisponde alla precisione più alta.

**Tabella 3. Classi di precisione  $C_p$  e parametri corrispondenti.**

	<b><math>C_p = 1</math></b>	<b><math>C_p = 2</math></b>	<b><math>C_p = 3</math></b>
<b>span</b>	30	40	45
<b>space gap</b>	0.013	0.025	0.03
<b>time gap</b>	13	20	25

I nodi identificati attraverso questo procedimento possono essere considerati nodi generici. Si è visto tuttavia che fra questi nodi si possono individuare anche i nodi fondamentali. L'operazione di selezione dei nodi fondamentali fra quelli generici è stata compiuta necessariamente tramite un'analisi "manuale" eseguita compito per compito, utilizzando l'ausilio grafico fornito dal software Multimod per visualizzare la posizione della mano di riferimento in ogni fotogramma di ciascun compito.



**Figura 22.** I circoletti, indicanti i punti della traiettoria di  $P1^r$  individuati come nodi, rappresentano il risultato finale del procedimento.

#### **4.4 Definizione degli errori ammissibili**

Un'architettura protesica con un numero di gdl inferiore a 6 non può in generale eseguire esattamente una traiettoria prefissata in modo arbitrario. Per valutare se, nonostante ciò, essa è in grado di attuare un compito di manipolazione occorre stabilire quali siano gli errori ammissibili per la traiettoria simulata della mano, ovvero di quanto e in che modo la traiettoria simulata si possa scostare dalla traiettoria di riferimento. Tale valutazione avviene nei nodi. Se un'architettura, in un qualunque nodo, non è in grado di approssimare sufficientemente la traiettoria di riferimento col proprio organo terminale, si riterrà che questa non può svolgere il compito.

Sono state esaminate diverse modalità per definire gli errori ammissibili in un dato nodo:

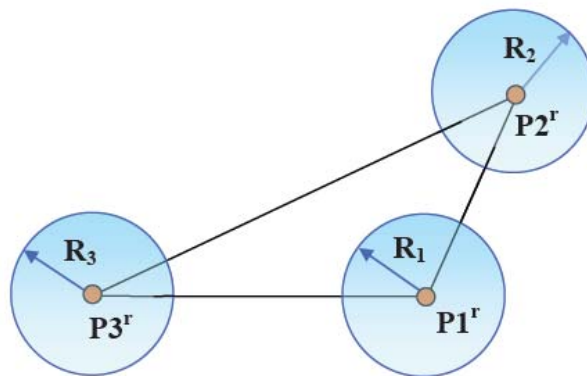
- definizione tramite coordinate naturali, considerando le distanze dei punti  $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$  dai rispettivi punti omologhi di riferimento  $P_1^r$ ,  $P_2^r$  e  $P_3^r$ ;
- definizione per mezzo di posizione e orientamento relativi di due sistemi di riferimento, solidali rispettivamente alla mano simulata e alla mano di riferimento; in particolare per determinare l'orientamento sono state considerate le seguenti parametrizzazioni:
  - angoli di Eulero;
  - asse/angolo e quaternioni unitario (parametri di Eulero);
  - Coordinate Sferiche di Rotazione .

Dopo aver analizzato queste opzioni, si è scelto di definire due sistemi di riferimento solidali alle mani, caratterizzando l'errore di orientamento per mezzo delle Coordinate Sferiche di Rotazione. Tale soluzione ha permesso di trattare in modo indipendente l'errore di posizione e l'errore di orientamento, e di descrivere quest'ultimo in modo intuitivo ed efficace, fornendo un'interpretazione geometrica di semplice visualizzazione. Le modalità elencate sono di seguito descritte.

#### 4.4.1 Definizione tramite coordinate naturali

Poiché la traiettoria di riferimento della mano è definita dalle coordinate cartesiane che i tre punti  $P_1^r$ ,  $P_2^r$  e  $P_3^r$  assumono in corrispondenza dei nodi, gli errori ammissibili potrebbero essere pensati come le regioni di spazio entro le quali si devono collocare i punti  $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$ . Si può ad esempio supporre che la distanza di ciascuno dei tre punti notevoli dalla rispettiva posizione di riferimento non debba superare un determinato valore di soglia. In questo modo verrebbero definite in ogni nodo della traiettoria di riferimento tre sfere centrate in  $P_1^r$ ,  $P_2^r$  e  $P_3^r$ , aventi raggi  $R_1$ ,  $R_2$  ed  $R_3$  rispettivamente e rappresentanti altrettante regioni di spazio in cui le posizioni di  $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$  sarebbero ritenute accettabili ai fini di una corretta esecuzione del compito (Figura 23). Le condizioni per l'accettabilità di una traiettoria simulata, da verificarsi contemporaneamente in ogni nodo, avrebbero quindi la seguente forma:

$$\begin{cases} |\bar{P}_1^r - \bar{P}_1^s| \leq R_1 \\ |\bar{P}_2^r - \bar{P}_2^s| \leq R_2 \\ |\bar{P}_3^r - \bar{P}_3^s| \leq R_3 \end{cases} .$$



**Figura 23. Possibile rappresentazione degli errori ammissibili in un dato nodo della traiettoria di riferimento: tre sfere individuano altrettante regioni di spazio in cui sono considerate ammissibili le posizioni dei punti  $P_1^s$ ,  $P_2^s$  e  $P_3^s$  della traiettoria simulata.**

Tale metodo non è tuttavia idoneo al caso in esame. Dall'osservazione dei compiti, infatti, è emersa la necessità di valutare in modo indipendente orientamento e posizione della mano. Si consideri ad esempio il trasporto dal tavolo alla bocca di un bicchiere pieno di liquido: il fatto che il liquido non si rovesci è maggiormente rilevante rispetto al tragitto che il bicchiere compie per arrivare alla bocca. In altre parole l'inclinazione dell'asse di simmetria del bicchiere rispetto alla verticale non deve superare un determinato valore, mentre il percorso del bicchiere è entro certi limiti indifferente, purché giunga alla bocca. La valutazione con coordinate naturali, invece, considera la posa nel suo insieme, non permettendo di separare in modo semplice posizione e orientamento e di dar loro un'interpretazione fisica facilmente comprensibile.

#### 4.4.2 Definizione tramite posizione e orientamento relativi di sistemi di riferimento

L'esempio sopra riportato illustra come con la metodologia precedentemente mostrata risulti problematico ammettere un piccolo errore di orientamento e permettere un ampio errore sulla posizione. La modalità più immediata per raggiungere tale scopo è la definizione di una opportuna terna di riferimento solidale alla mano. Tale terna può essere ad esempio identificata mediante i punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . Si può in questo modo attribuire all'origine della terna la funzione di individuare

la posizione della mano nello spazio, e descrivere per mezzo dell'orientamento degli assi della stessa l'orientamento della mano.

L'errore di posizione può essere in tal modo definito come la distanza tra le origini ( $O^s$  e  $O^r$ ) delle terne di riferimento  $S_s$  e  $S_r$  solidali rispettivamente alla mano simulata e alla mano di riferimento. Tale distanza, per una esecuzione corretta del compito, dovrà risultare inferiore a un appropriato valore ammissibile  $d$ , specifico per ogni nodo  $n$ :

$$|\bar{O}^r - \bar{O}^s| < d(n).$$

Risulta di complessità notevolmente maggiore la determinazione dell'errore di orientamento ammissibile. Il numero minimo di parametri indipendenti per descrivere l'orientamento di un corpo rigido nello spazio è tre (in questo caso si dice che viene fornita una rappresentazione minima dell'orientamento). Esistono tuttavia diverse modalità per descrivere l'orientamento relativo di due terne. Le modalità principali messe in luce nella sezione precedente (paragrafo 4.4) vengono brevemente presentate e discusse nel seguito.

### *Angoli di Eulero*

Una rappresentazione minima dell'orientamento può essere fornita per mezzo degli angoli di Eulero. Tale rappresentazione è costituita da un insieme di tre angoli ( $\varphi$ ,  $\theta$  e  $\psi$ ) ciascuno dei quali individua una rotazione intorno a uno degli assi coordinati del sistema mobile (in questo caso il sistema solidale alla mano simulata, da considerarsi mobile rispetto alla mano di riferimento in questa operazione di definizione dell'errore). Le rotazioni si considerano avvenute secondo una sequenza ben determinata, tale da garantire che due rotazioni successive non avvengano attorno allo stesso asse. Questa condizione limita a 12, fra i 27 possibili, gli insiemi di tre angoli accettabili. Una sequenza di rotazioni comunemente utilizzata è la cosiddetta ZYZ, dal nome degli assi intorno a cui avvengono le rotazioni. Con tale metodo una generica matrice di rotazione  $R = R(\varphi, \theta, \psi)$  può essere ricavata moltiplicando le matrici rappresentanti le tre rotazioni elementari menzionate:

$$R(\varphi, \theta, \psi) = R_z(\varphi)R_y(\theta)R_z(\psi).$$

La definizione di un errore di orientamento ammissibile con angoli di Eulero presenta tuttavia notevoli difficoltà. L'errore di orientamento accettabile, infatti, è valutato in modo intuitivo, in base all'osservazione della particolare azione di manipolazione considerata. Da una valutazione su quali siano gli orientamenti ritenuti idonei occorre quindi determinare quale sia un intervallo accettabile per ciascun angolo o per un indice determinato in base agli angoli stessi. Si deve cioè stabilire una relazione fisicamente ed intuitivamente interpretabile tra il valore degli angoli e l'entità dell'errore di orientamento. Risulta tuttavia difficile identificare tale legame in modo intuitivo ed efficace con la modalità di rappresentazione descritta.

### *Asse/angolo e Quaternione unitario (parametri di Eulero)*

Per definire l'errore di orientamento possono essere impiegate soluzioni alternative, ricorrendo ad esempio a rappresentazioni non minime per mezzo di quattro parametri. In particolare possono essere utilizzate le due rappresentazioni comunemente denominate asse/angolo e quaternione unitario (in quest'ultimo caso i parametri sono detti di Eulero). Entrambe le rappresentazioni fanno riferimento alla rotazione di un angolo  $\theta$  attorno ad un asse individuato dal vettore  $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]$ . Tale tipo di formulazione ha validità generale in quanto per il teorema di Eulero è sempre possibile sovrapporre due sistemi di riferimento aventi origine coincidente ruotando uno dei due sistemi attorno ad un opportuno asse fisso. Si potrebbe pensare quindi di esprimere l'ampiezza di rotazione ammissibile in termini dell'angolo  $\theta$ . Tuttavia, se si considera nuovamente l'esempio del compito in cui occorre portare alla bocca un bicchiere pieno di liquido, si osserva che una rotazione  $\theta$  attorno

all'asse del bicchiere può risultare ininfluente, mentre una rotazione della medesima ampiezza intorno ad un asse ad esso perpendicolare può causare il rovesciamento del liquido stesso. Tale osservazione porta a concludere che, in generale, la rotazione ammissibile  $\theta_{amm}$  è funzione di  $\mathbf{r}$ :

$$\theta_{amm} = \theta_{amm}(\mathbf{r}).$$

Anche la determinazione della relazione fra  $\theta_{amm}$  ed  $\mathbf{r}$  risulta di complessa definizione (l'angolo  $\theta_{amm}$  è funzione di due variabili indipendenti, la terza risulta determinata dal fatto che il versore  $\mathbf{r}$  ha modulo unitario).

### *Coordinate Sferiche di Rotazione*

A causa delle difficoltà nell'implementazione delle comuni tecniche precedentemente descritte, si è ricercata una rappresentazione alternativa in grado di soddisfare in modo efficiente le esigenze richieste. Tali esigenze in particolare sono:

- i parametri utilizzati devono poter essere facilmente ricondotti ad un significato fisico, di immediata interpretazione e “visualizzazione”, in modo da permettere una semplice definizione dell'errore ammissibile per l'orientamento;
- la soluzione adottata deve essere la più generale possibile, tale cioè da essere applicabile ai diversi compiti di manipolazione considerati in questo studio.

Si è osservato che le Coordinate Sferiche di Rotazione [17], sviluppate per un'applicazione diversa da quella qui mostrata, (in particolare, sono state studiate per la descrizione dell'orientamento dell'omero) risultano idonee per l'applicazione in esame.

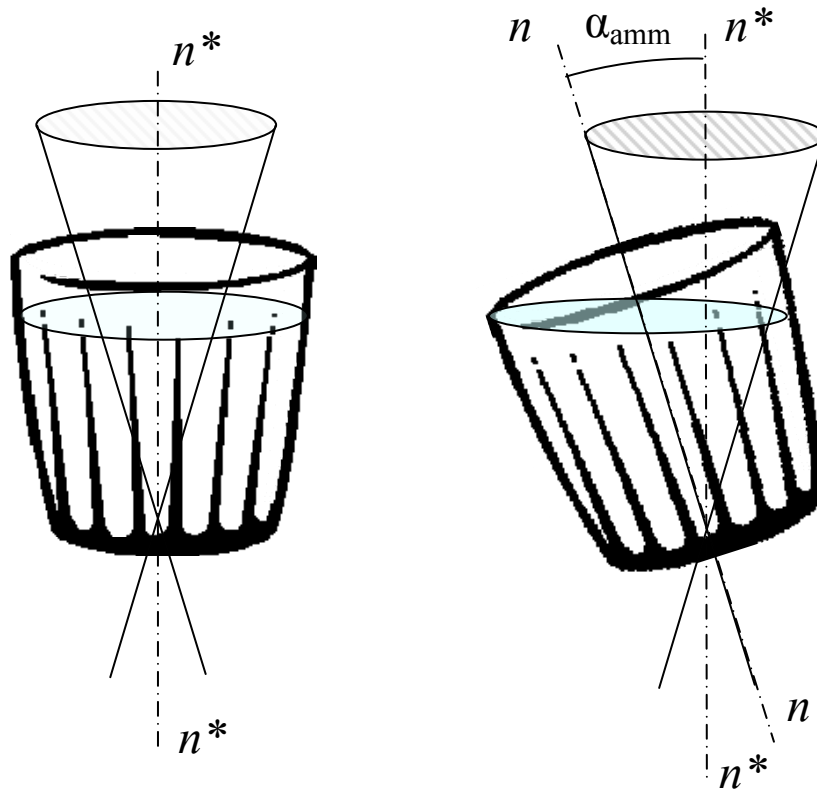
Verranno di seguito riportate le considerazioni che hanno condotto alla scelta di tali coordinate e all'identificazione della loro modalità di calcolo e di impiego.

Si consideri nuovamente l'esempio del trasporto del bicchiere e si assuma, come sarà precisato successivamente, che il bicchiere possa essere considerato solidale alla mano, con la quale costituisce un unico corpo rigido. Si è detto in precedenza come risulti prioritario evitare il rovesciamento del liquido. Per evitare ciò occorre imporre che l'asse di simmetria del bicchiere non si scosti eccessivamente dalla verticale, ovvero che l'angolo  $\alpha$  formato da tale asse con la verticale sia inferiore a un dato valore ammissibile  $\alpha_{amm}$ . Si è osservato inoltre che risulta significativo non solo in questo caso, ma per numerosi compiti, identificare un asse  $n$  solidale alla mano, rappresentato da un versore  $\mathbf{n}$  e definito per ogni azione di manipolazione, la cui direzione risulta di particolare interesse nel definire l'orientamento corretto. Tale asse può ad esempio coincidere con direzioni rilevanti degli oggetti manipolati, quali possono essere la direzione longitudinale di un coltello, o l'asse di un generico oggetto cilindrico. Se in generale non è possibile considerare che tali direzioni siano solidali alla mano, questo può essere tuttavia ammesso per la manipolazione eseguita con la mano mioelettrica, la quale permette poca o nulla versatilità nell'impugnatura. Gli oggetti vengono perciò afferrati con una modalità determinata e ripetibile, e possono essere perciò intesi come rigidamente connessi alla mano. Frequentemente quindi la condizione sull'orientamento ( $\alpha \leq \alpha_{amm}$ ) può essere espressa come:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^* = \cos \alpha \geq \cos \alpha_{amm},$$

dove  $\mathbf{n}$  è il versore dell'asse solidale alla mano simulata,  $\mathbf{n}^*$  è il versore dell'asse solidale alla mano di riferimento e  $\alpha$  l'angolo fra di essi formato. L'angolo  $\alpha$ , definito in questo modo, risulta compreso fra 0 e  $\pi$ , per cui l'operazione  $\arccos(\alpha)$  per la determinazione di  $\alpha$  non presenta ambiguità di segno. Volendo fornire un'interpretazione geometrica,  $\alpha_{amm}$  può essere visto come l'angolo di semi-apertura del cono di asse  $n^*$  (d'ora in avanti si indicherà la retta con una lettera in corsivo e il versore relativo a tale retta con la medesima lettera in grassetto) entro il quale si deve

collocare l'asse  $n$  affinché l'orientamento della mano simulata possa essere considerato corretto (vedi Figura 24).



**Figura 24. Interpretazione geometrica dell'impiego dell'asse  $n$  per la valutazione dell'orientamento ammissibile. L'angolo  $\alpha_{amm}$  rappresenta la semiapertura del cono entro il quale  $n$  si deve collocare per un'esecuzione corretta dell'operazione di manipolazione, in questo caso il trasporto di un bicchiere pieno di liquido.**

Tale formulazione, che sfrutta un solo parametro, non è tuttavia sufficiente per essere applicata a tutti i compiti. Si pensi ad esempio al posizionamento di un coltello con cui si vuole tagliare del cibo. Applicando la suddetta formulazione, l'asse  $n$  potrebbe essere identificato in questo caso con l'asse longitudinale del coltello. Tuttavia l'orientamento opportuno di tale asse non garantisce un'esecuzione corretta dell'operazione di taglio: è necessario infatti che la lama sia orientata perpendicolarmente alla superficie da tagliare. Si potrebbe quindi pensare di imporre un ulteriore vincolo, questa volta alla rotazione intorno ad  $n$  (vedi Figura 25). Posta  $\mathcal{G}$  l'ampiezza di tale rotazione, le condizioni divengono le seguenti:

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \alpha_{amm} \\ \mathcal{G} &\leq \mathcal{G}_{amm} \end{aligned}$$

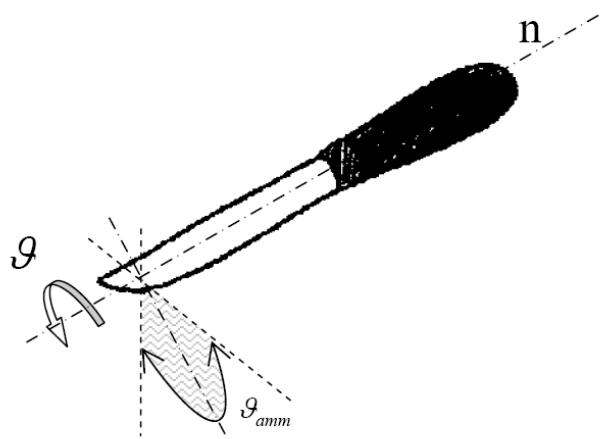


Figura 25. Condizione relativa alla rotazione intorno all'asse  $n$  nel caso in cui si usi un coltello per tagliare del cibo. Il valore massimo ammesso per tale rotazione è pari a  $g_{amm}$ .

Gli angoli  $\alpha$  e  $\theta$  così definiti possono essere univocamente determinati a partire da una generica posa relativa delle due mani (simulata e di riferimento). Il calcolo di  $\theta$ , in particolare, è opportuno che avvenga in modo tale che l'asse attorno al quale viene misurato sia effettivamente perpendicolare all'asse della rotazione  $\alpha$ , in modo da tale da risultare indipendente da esso. Si fissino per un dato nodo due sistemi di riferimento ausiliari omologhi  $S_s$  (i versori degli assi del quale siano  $\mathbf{u}_s, \mathbf{v}_s, \mathbf{w}_s$ ) e  $S_r$  (con versori  $\mathbf{u}_r, \mathbf{v}_r, \mathbf{w}_r$ ), solidali rispettivamente alla mano simulata e alla mano di riferimento. Tali sistemi possono essere determinati in base alle posizioni di  $P_1, P_2$  e  $P_3$ , in modo tale che l'asse  $w$  coincida con  $n$  ( $\mathbf{w}_s \equiv \mathbf{n}, \mathbf{w}_r \equiv \mathbf{n}^*$ ). Si consideri, senza perdere in generalità, che l'origine dei due sistemi sia sovrapposta. L'angolo  $\alpha$  risulta essere l'ampiezza di rotazione necessaria per sovrapporre  $w_s$  a  $w_r$  (vedi Figura 26). Tale rotazione avviene attorno ad un asse perpendicolare sia a  $w_s$  che a  $w_r$ . Il versore  $\mathbf{r}$  dell'asse di rotazione può essere quindi determinato come:

$$\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)^T = \frac{\mathbf{w}_s \wedge \mathbf{w}_r}{|\mathbf{w}_s \wedge \mathbf{w}_r|} = \frac{\mathbf{w}_s \wedge \mathbf{w}_r}{\sin \alpha}.$$

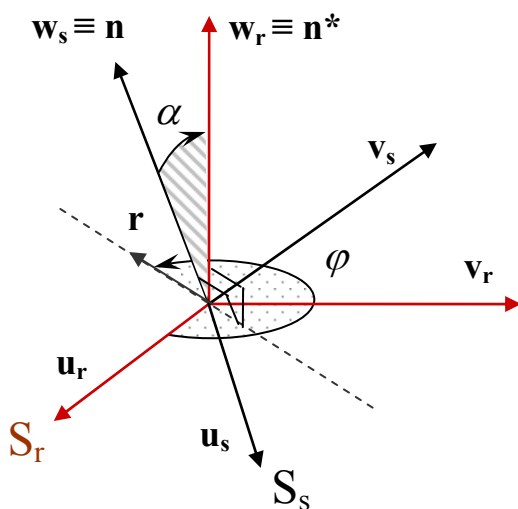


Figura 26. Sistemi  $S_r$  e  $S_s$ , aventi origini coincidenti. Sono evidenziati il versore  $\mathbf{r}$  e gli angoli  $\alpha$  e  $\varphi$ .  $\mathbf{r}$  giace nel piano  $\mathbf{u}_r, \mathbf{v}_r$  ed è perpendicolare a  $\mathbf{n}$  ed  $\mathbf{n}^*$ .

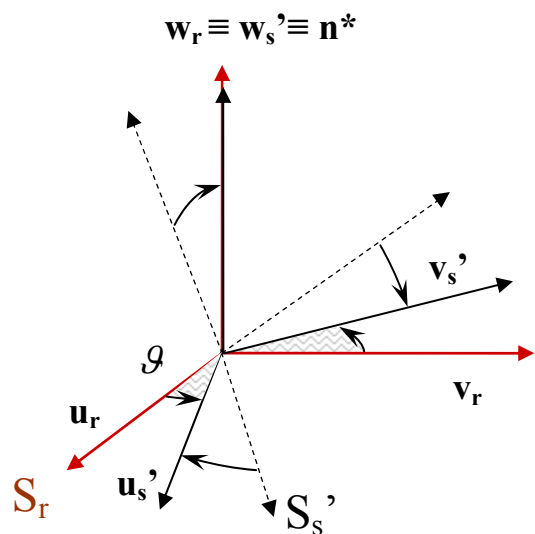


Figura 27. Rotazione di ampiezza  $\alpha$  di  $S_s$  in posizione  $S_s'$ , in modo da portare a coincidere  $\mathbf{n}$  ed  $\mathbf{n}^*$ . L'angolo  $\theta$  è l'angolo compreso fra  $\mathbf{u}_r$  e  $\mathbf{u}_s'$ , nel piano  $\mathbf{u}_r, \mathbf{v}_r$ .

Poiché  $\mathbf{r}$  è perpendicolare a  $\mathbf{w}_r$ , si ha che  $\mathbf{r}$  giace nel piano  $(\mathbf{u}_r, \mathbf{v}_r)$ . Utilizzando la formulazione asse/angolo è possibile determinare immediatamente la matrice  $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\alpha, \mathbf{r})$ , corrispondente alla rotazione di ampiezza  $\alpha$  attorno ad  $\mathbf{r}$ :

$$\mathbf{R}(\alpha, \mathbf{r}) = \begin{bmatrix} r_x^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & r_x r_y(1 - \cos \alpha) - r_z \sin \alpha & r_x r_z(1 - \cos \alpha) + r_y \sin \alpha \\ r_x r_y(1 - \cos \alpha) + r_z \sin \alpha & r_y^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & r_y r_z(1 - \cos \alpha) - r_x \sin \alpha \\ r_x r_z(1 - \cos \alpha) - r_y \sin \alpha & r_y r_z(1 - \cos \alpha) + r_x \sin \alpha & r_z^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Descrivendo l'orientamento di  $S_s$  ed  $S_s'$  rispettivamente per mezzo delle matrici  $\mathbf{S}_s = [\mathbf{u}_s \ \mathbf{v}_s \ \mathbf{w}_s]^T$  ed  $\mathbf{S}_s' = [\mathbf{u}_s' \ \mathbf{v}_s' \ \mathbf{w}_s']^T$ , si ha quindi che

$$\mathbf{S}_s' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}_s,$$

in cui  $S_s'$  è tale che  $\mathbf{w}_s' \equiv \mathbf{w}_r$  (vedi Figura 27). In alternativa si può pervenire al medesimo risultato ruotando il sistema  $S_r$  per mezzo della matrice di rotazione  $\mathbf{R}' = \mathbf{R}(-\alpha, \mathbf{r})$ . Si può infine calcolare  $\theta$  come:

$$\mathcal{G} = \arccos(\mathbf{u}_s' \cdot \mathbf{u}_r) = \arccos(\mathbf{v}_s' \cdot \mathbf{v}_r).$$

In questo modo si ottiene un valore di  $\theta$  compreso fra 0 e  $\pi$ . Nel caso in cui risulti di interesse determinare il verso di rotazione di  $\theta$  (cioè considerare  $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ), si rende necessario anche il calcolo di  $\sin \theta$ , dal quale è possibile desumere il segno dell'angolo:

$$\sin \mathcal{G} = \mathbf{u}_s' \cdot \mathbf{v}_r.$$

Si noti come gli angoli  $\alpha$  e  $\theta$  risultino essere fra loro indipendenti in quanto descrivono ampiezze di rotazione intorno ad assi fra loro perpendicolari. Risulta pertanto ininfluente la sequenza con cui avvengono tali rotazioni. Ciò permette di attribuire loro un significato fisico immediato e facilmente interpretabile, in quanto è più semplice, rispetto ai metodi precedentemente mostrati, visualizzare intuitivamente le rotazioni avvenute.

Si può osservare, inoltre, come la descrizione dell'orientamento avvenga tramite l'utilizzo di due soli parametri. Fissati  $\alpha$  e  $\theta$ , sono quindi possibili  $\infty^1$  orientamenti, essendo necessario un terzo parametro per ottenere una descrizione minima e quindi univoca dell'orientamento. Si è infatti trascurato di imporre un vincolo alla direzione del versore  $\mathbf{r}$ , che come si è detto giace nel piano  $(\mathbf{u}_r, \mathbf{v}_r)$ . Denominando con  $\varphi$  l'angolo compreso fra  $\mathbf{r}$  e  $\mathbf{u}_r$ , si definisce anche la direzione di  $\mathbf{r}$  e si ottiene perciò una rappresentazione univoca e minima dell'orientamento relativo delle terne solidali alla mano simulata e alla mano di riferimento per mezzo dei tre parametri  $\alpha$ ,  $\theta$  e  $\varphi$ . Tali parametri costituiscono le Coordinate Sferiche di Rotazione [17].

Per la specifica applicazione considerata, dall'esame dei compiti è emerso tuttavia che, scegliendo opportunamente  $\mathbf{n}$  e avvalendosi solamente dei due soli parametri  $\alpha_{amm}$  e  $\theta_{amm}$ , è possibile esprimere correttamente le condizioni relative all'orientamento ammissibile in tutti i casi considerati. Nonostante ciò, volendo generalizzare il più possibile tale formulazione, si può considerare che  $\alpha_{amm}$  sia variabile in funzione di  $\varphi$ , ovvero che

$$\alpha_{amm} = \alpha_{amm}(\varphi).$$

In tal modo la definizione dell'orientamento ammissibile diventa leggermente più complessa ma molto più versatile.

Ad esempio si potrebbe considerare che il cono definito da  $\alpha_{amm}$  abbia sezione ellittica (Figura 28a).  $\alpha_{amm}$  varierà quindi tra un  $\alpha_{max}$  e un  $\alpha_{min}$ . Se si definisce  $S_r$  in modo tale che  $\mathbf{u}_r$  individui il semi-asse maggiore di tale ellisse, si avrà che

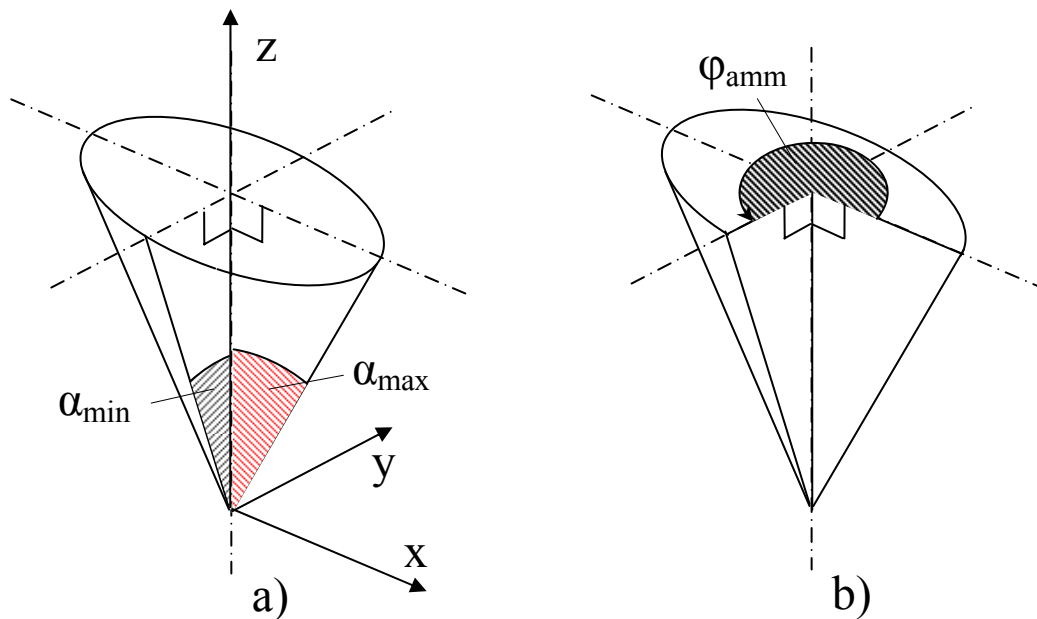


$$\alpha_{amm} = \alpha_{max}, \text{ per } \varphi = 0, \pi ;$$

$$\alpha_{amm} = \alpha_{min}, \text{ per } \varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} .$$

Per un angolo  $\varphi$  generico si ottiene:

$$\alpha_{amm} = \arctan \left( \frac{\tan \alpha_{max} \cdot \tan \alpha_{min}}{\sqrt{\tan^2 \alpha_{max} \sin^2 \varphi + \tan^2 \alpha_{min} \cos^2 \varphi}} \right) .$$



**Figura 28a e b.** Il cono definito da  $\alpha_{amm}$  può avere sezione ellittica (Figura 28a), in cui il valore di  $\alpha_{amm}$  varia tra  $\alpha_{max}$  e  $\alpha_{min}$ . Si possono inoltre individuare settori di cono in cui  $\alpha_{amm} = 0$  (Figura 28b).

È possibile inoltre definire dei settori in cui  $\alpha_{amm} = 0$ . Ciò corrisponde a considerare che ci siano dei valori ammissibili anche per l'angolo  $\varphi$  (Figura 28b). Tale possibilità risulta utile nel caso in cui il manipolatore sia prossimo ad ostacoli che ne impediscano il movimento solo verso determinate direzioni.

Nel seguito verrà descritta l'applicazione delle Coordinate Sferiche di Rotazione alla definizione dell'errore ammissibile nei casi di interesse per questo studio.

Per quanto riguarda la definizione dei sistemi di riferimento della mano nei nodi delle traiettorie, sono stati associati a ciascun nodo una origine e un asse  $\mathbf{n}$  specifici, fra di loro indipendenti. Infatti la verifica dell'errore di orientamento viene effettuata nei nodi e in ciascuno di essi le condizioni di ammissibilità sono generalmente differenti.

I punti identificati come origini dei sistemi di riferimento impiegati sono stati classificati come descritto in Tabella 4. Nella prima colonna sono riportati i numeri identificativi delle possibili posizioni che sono state definite, nella seconda vengono descritte le suddette posizioni e nella terza e quarta sono presentati gli esempi ad esse relativi.

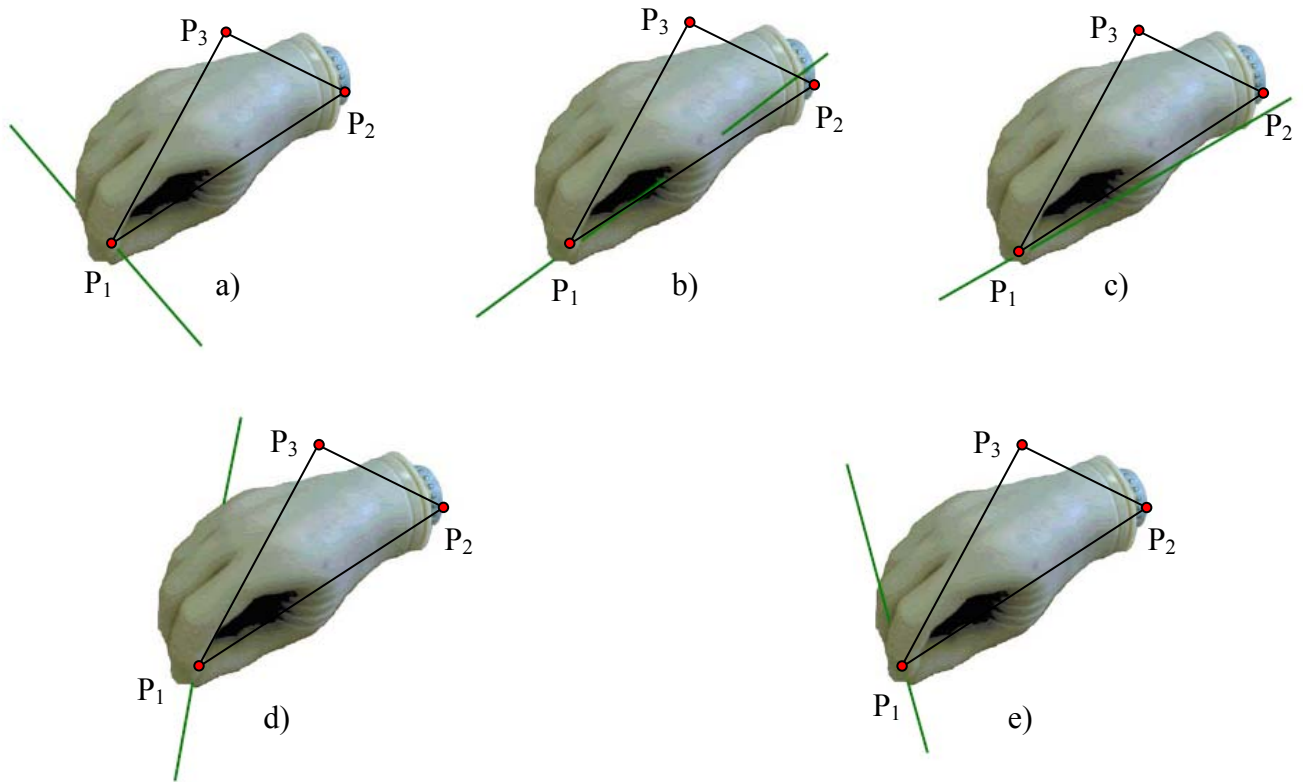
**Tabella 4. Possibili posizioni per l'origine del sistema di riferimento.**

Classe	Descrizione	Esempio	
		Azione	Significato fisico
1	$P_1$	Afferrare bicchiere	Punto di presa
2	100 mm da $P_1$ lungo asse 3 verso l'esterno della mano	Inforcare cibo	Estremità forchetta
3	40 mm da $P_1$ lungo asse 4 verso il basso	Sfogliare libro	Estremità pollice
4	100 mm da $P_1$ lungo asse 2b verso l'esterno della mano	Tagliare carne	Estremità coltello
5	100 mm da $P_1$ lungo asse 1 verso l'esterno della mano	Versare liquido in bicchiere	Estremità collo bottiglia
6	200 mm da $P_1$ lungo asse 1 verso l'esterno della mano	Eeguire igiene perineale	Centro spugna dell'ausilio
7	100 mm da $P_1$ lungo asse 2a verso l'esterno della mano	Appoggiare piatto	Centro piatto

Riguardo all'orientamento, ricordando la collocazione dei punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  e la definizione del piano  $\pi$  a cui essi appartengono (vedi paragrafo 4.2), si sono determinate le direzioni di opportuni versori  $\mathbf{n}$  rispetto alla mano. Le possibili configurazioni del versore  $\mathbf{n}$  sono descritte in Tabella 5 e mostrate in Figura 29. Per ogni configurazione è presentato un esempio che associa all'orientamento descritto un possibile significato fisico dell'asse. A titolo di esempio si è determinato per ogni orientamento una opportuna origine del sistema di riferimento che individua la posizione della mano. L'origine del sistema di riferimento può tuttavia essere selezionata in modo indipendente da  $\mathbf{n}$ .

**Tabella 5. Possibili configurazioni di  $\mathbf{n}$ .**

Conf.	Descrizione	Esempio	
		Significato dell'asse	Origine del sistema di riferimento
1	Perpendicolare al piano $\pi$	Asse del bicchiere	1
2a	Sul piano $\pi$ , ruotando $P_1P_2$ di 30 gradi (diretto da $P_1$ verso il palmo, fra indice e pollice)	Parallela ai denti del pettine	1
2b	Come 2, ma ruotato di 30 gradi rispetto al piano $\pi$ (verso l'esterno della mano)	Asse della biro	1
3	Come 2, ma ruotato di 120 gradi rispetto al piano $\pi$ (verso l'esterno della mano)	Asse del manico della forchetta	2
4	Nel piano $\pi$ , perpendicolare a 2a	Perpendicolare al centro della concavità del cucchiaio	2



**Figura 29.** Rappresentazione grafica delle possibili configurazioni di  $n$ . Figura 29a: asse 1; Figura 29b: asse 2a; Figura 29c: asse 2b; Figura 29d: asse 3; Figura 29e: asse 4.

Al fine di valutare l'accettabilità della posa della mano, sono state definite alcune classi di errore ammissibile per lo scostamento  $d$  della posizione ( $C_d$ ) e per gli errori di rotazione  $\alpha$  e  $\theta$  (rispettivamente classi  $C_\alpha$  e  $C_\theta$ ). Gli angoli  $\alpha$  e  $\theta$ , come si è detto, sono ritenuti sufficienti per descrivere l'errore di orientamento per tutti i casi esaminati. Per permettere una opportuna versatilità, le rotazioni ammissibili  $\alpha$  e  $\theta$ , così come lo scostamento  $d$ , possono essere attribuite indipendentemente, in modo tale che nel medesimo nodo possono appartenere a classi diverse. Le classi di errore (piccolo, medio, grande e molto grande), definite in modo da individuare alcune categorie significative di errori in base all'entità di questi ultimi, sono mostrate in Tabella 6. In particolare per le rotazioni, una tolleranza di  $180^\circ$  indica che è ammessa la rotazione completa intorno all'asse.

**Tabella 6.** Classi di errori ammissibili per la posa della mano, espressi come tolleranze sullo scostamento  $d$  della posizione e sugli errori di rotazione  $\alpha$  e  $\vartheta$ .

Classe di errore ammissibile	Piccolo (1)	Medio (2)	Grande (3)	Molto grande (4)
$d_{amm}$ [mm]	50	100	200	400
$\alpha_{amm}$ [deg]	15	45	90	180
$\vartheta_{amm}$ [deg]	15	45	90	180

Per quanto riguarda la determinazione di  $d$  ammissibile, una prima indicazione è stata ottenuta valutando l'ampiezza del movimento del centro della spalla concesso dal cingolo scapolare. Tale ampiezza è rappresentativa, almeno come ordine di grandezza, dei movimenti fini resi possibili alla

mano non grazie all'utilizzo delle articolazioni dell'arto protesico, bensì grazie al movimento del punto di ancoraggio della protesi al torace, cioè al movimento del centro della spalla. Tali movimenti sono effettivamente utilizzati dagli attuali portatori di protesi per compiere numerosi compiti. I valori del ROM del cingolo scapolare sono stati mostrati nel paragrafo 3.5.2.

La determinazione degli errori ammissibili in ciascun nodo fondamentale è stata eseguita necessariamente nodo per nodo, essendo tali errori altamente specifici e rilevanti. Per quanto riguarda i nodi generici, invece, si è utilizzata per la definizione di  $d_{amm}$  la suddivisione esposta nel paragrafo precedente, la quale classifica i compiti in base alla precisione richiesta per la loro esecuzione (classe di precisione  $C_p$ ). Nella maggioranza dei casi, si può inoltre ritenere che per i nodi generici sia trascurabile l'orientamento della mano, in quanto essi indicano solitamente punti del percorso che rappresentano un semplice raccordo fra i nodi fondamentali. Per un nodo generico, quindi, si è imposto che:

- $C_d = C_p + 1$ ;
- $C_\alpha = 4$ ;
- $C_\theta = 4$ ;

In alcuni compiti tuttavia, come già visto, riveste un'importanza particolare il tragitto compreso fra due o più nodi, per i quali si vuole tenere controllato l'errore di posa in modo differente rispetto alle linee guida generali appena descritte. Ad esempio, per "Bere da bicchiere" occorre che fra il nodo in cui si afferra il bicchiere e quello in cui lo si porta alla bocca non si rovesci il liquido contenuto nel bicchiere: si è quindi imposto che l'errore di orientamento effettivo abbia una classe  $C_\alpha = 2$  e  $C_\theta = 4$  su tutti i nodi del percorso (che sono molti, per poter controllare la traiettoria in modo preciso).

La Tabella 7 mostra la definizione degli errori ammissibili per alcuni compiti.

**Tabella 7. Classi degli errori ammissibili, origine del sistema di riferimento e asse  $n^*$  prescelti per i nodi fondamentali di alcuni compiti.**

Azione	Fotogramma nodo fondamentale	Origine del sistema di riferimento	$C_d$	$n^*$	$C_\alpha$	$C_\theta$
<b>Tagliare cibo con coltello</b>						
$C_p = 1$						
Taglio	Da 248 a 414	4	1	2b	1	1
<b>Bere da bicchiere</b>						
$C_p = 1$						
Presa del bicchiere	100	1	1	1	1	3
Trasporto bicchiere	Da 211 a 329	1	1	1	1	3
Assunzione liquido	Da 329 a 374	1	1	1	1	2
Deposito bicchiere	563	1	2	1	2	4
<b>Scrivere</b>						
$C_p = 1$						
Tracciamento linea	Da 100 a 216	1	1	2b	1	4
Tracciamento linea	Da 308 a 416	1	1	2b	1	4
<b>Uso telefono fisso BIS</b>						
$C_p = 2$						
Presa cornetta	209	1	1	1	1	1

Appoggio cornetta	290	1	3	1	2	3
Digitazione numero	451	3	1	2a	2	3
Presa cornetta	613	1	1	1	1	2
Posizionamento all'orecchio	768	1	1	1	1	2
Deposito cornetta	951	1	1	1	1	1

## 5 Conclusioni

Il lavoro svolto si colloca come parte integrante e fondamentale in uno studio più ampio [1], che consiste nell'elaborazione di una procedura finalizzata alla determinazione dell'architettura protesica ottimale per un dato paziente amputato d'arto superiore. Tale procedura è denominata DOPA: Determination of the Optimal Prosthesis Architecture. Scopo della procedura DOPA è quello di determinare una idonea geometria e topologia del braccio robotico, ovvero il numero delle coppie cinematiche rotoidali della protesi, il loro tipo (attuate o passive) e la loro mutua disposizione. L'architettura individuata come "ottimale" dovrà soddisfare al meglio i diversi requisiti di funzionalità (in termini di prestazioni ed accuratezza del braccio robotico) e portabilità (leggerezza e semplicità, facilità di controllo) associati ad un profilo di paziente.

Nella suddetta procedura sono considerati diversi aspetti: la funzionalità, in particolare, gioca un ruolo importante per la valutazione finale dell'architettura protesica. Per eseguire tale valutazione è prevista l'esecuzione di simulazioni cinematiche e cinetostatiche, nelle quali viene verificata la capacità di compiere attività di vita quotidiana da parte di differenti modelli di architetture (con un numero di coppie attuate variabile fra uno e sei). In questo lavoro sono state perciò determinate per via sperimentale opportune traiettorie che permettessero di identificare la modalità "corretta" di eseguire i compiti assegnati e che potessero essere implementate come traiettorie di riferimento negli algoritmi di simulazione della procedura DOPA. La ricerca nella letteratura di tali traiettorie di riferimento non ha condotto a risultati soddisfacenti, in quanto non è stato possibile reperire traiettorie che tenessero conto del contesto e dei vincoli caratteristici dei portatori di protesi. Nella quasi totalità dei casi è stata inoltre riscontrata la mancanza delle informazioni necessarie per risalire alla posa della mano (viene focalizzata infatti l'analisi cinematica dei giunti dell'arto superiore), la conoscenza della quale è ritenuta invece un requisito fondamentale per l'applicazione in esame.

Questo lavoro è finalizzato alla determinazione delle traiettorie di riferimento, ed è stato strutturato in tre parti:

- analisi delle attività di manipolazione, con cui sono state definite le modalità di esecuzione dei compiti motori (con conseguente definizione di uno specifico protocollo di analisi sperimentale del movimento);
- determinazione delle traiettorie di riferimento, realizzata sperimentalmente per mezzo di un sistema optoelettronico di analisi del movimento;
- definizione delle modalità di rappresentazione delle traiettorie di riferimento che verranno implementati nella DOPA.

Nella prima fase sono stati selezionati i compiti motori più significativi, determinando la loro modalità di esecuzione. Per definire tale modalità è stato necessario tenere conto delle finalità alle quali era orientata la determinazione delle traiettorie, ovvero del fatto che i compiti devono essere simulati con architetture protesiche indossate da un amputato portatore di protesi durante la sua vita

quotidiana. Sono state perciò considerate le inevitabili limitazioni che da ciò derivano, come l'assenza di abilità digitale, i problemi nel controllo e l'eventuale riduzione delle escursioni del moncone. Il protocollo per l'acquisizione delle prove sperimentali che è stato qui proposto è il risultato di un compromesso tra l'esigenza di non ignorare le attuali limitazioni (insieme agli accorgimenti impiegati attualmente dai pazienti per tentare di superarle) e la necessità di orientarsi allo sviluppo di nuove protesi, che dovranno possedere una maggiore funzionalità e quindi non presentare le stesse restrizioni di quelle attuali. La linea adottata è stata quella di considerare gli accorgimenti minimi necessari affinché l'esecuzione dei compiti risultasse ragionevolmente comoda per il paziente. Questi accorgimenti consistono nell'uso di alcuni ausili, movimenti compensatori e strategie motorie alternative. Di particolare rilievo è stata la scelta della mano protesica (un modello di mano mioelettrica attualmente in commercio) considerata per la simulazione della DOPA; tale scelta ha influito significativamente sulle modalità di impiego della mano durante le acquisizioni.

La seconda fase è stata effettuata tramite l'acquisizione sperimentale di 59 compiti per mezzo di un sistema optoelettronico a marcatori passivi. Un solo soggetto normodotato ha svolto tre volte ciascun compito. Ciò ha permesso una comparazione fra le tre successive esecuzioni, ma non un'analisi statistica fra esecuzioni di più soggetti. Tale scelta può essere giustificata dal fatto che diversi soggetti possono adottare strategie motorie completamente differenti, per cui l'adozione di una "traiettoria media" potrebbe condurre ad errori significativi, portando ad una rappresentazione del compito priva di significato. Al contrario, la scelta di una traiettoria ottenuta da un'unica esecuzione operata da un soggetto sano garantisce l'identificazione di una modalità sicuramente corretta di portare a termine il compito stesso. In particolare, nell'utilizzare la mano sana in modo tale da soddisfare i requisiti delle simulazioni, si è fatto uso di un dispositivo appositamente costruito per limitare la mobilità delle dita e riprodurre il movimento di presa della mano mioelettrica.

La terza fase è consistita nell'elaborazione delle traiettorie acquisite in modo tale da rendere efficiente e coerente il loro impiego nella DOPA. Differentemente da come i risultati vengono presentati abitualmente nella letteratura che tratta di analisi del movimento, le traiettorie sono state espresse nello Spazio Cartesiano, e non in termini di coordinate di giunto del braccio. Questa scelta è stata operata al fine di focalizzare l'attenzione sui compiti e non sulla postura dell'arto superiore durante l'esecuzione di questi da parte del soggetto. La posa della mano è stata rappresentata tramite Coordinate Naturali, nel caso specifico per mezzo delle coordinate cartesiane di tre punti solidali al corpo rigido mano. L'utilizzo delle Coordinate Naturali è scarsamente impiegata nel campo dell'analisi del movimento e in generale in biomeccanica. Tale modalità di individuare la posa della mano ha permesso di elaborare un algoritmo di simulazione cinematica coerente e maggiormente efficiente. Si è infatti evitato di trattare contemporaneamente grandezze non omogenee, quali angoli e distanze, nelle funzioni di ottimizzazione utilizzate per determinare la posa della mano simulata. La traiettoria è stata inoltre rappresentata attraverso la selezione di particolari punti significativi, o nodi, e trascurando le restanti parti di percorso. I nodi risultano importanti per individuare gli "obiettivi intermedi" nel movimento della mano (ad esempio l'aggiramento di ostacoli) o per fornire indicazioni riguardo alla forma della traiettoria. Questo tipo di descrizione risulta contemporaneamente estremamente sintetica e completa, in quanto fornisce tutte le informazioni necessarie per le finalità preposte. Per l'individuazione dei nodi è stato sviluppato un apposito algoritmo, basato sull'assunzione che i punti maggiormente significativi della traiettoria si trovano in prossimità dei minimi del raggio di curvatura della traiettoria stessa. È stata infine definita una nuova metodologia per valutare con quale errore la mano di un'architettura robotica è in grado di approssimare nelle simulazioni la traiettoria di riferimento (se l'architettura dispone di meno di 6 gdl, questi, in generale, non sono sufficienti per eseguire in modo esatto la traiettoria). In particolare l'errore di orientamento è stato determinato utilizzando le Coordinate Sferiche di Rotazione [17]. Delle tre variabili angolari che definiscono tale sistema di coordinate,

solo due ne sono state impiegate. Esse sono fra loro indipendenti e facilmente interpretabili. L'orientamento quindi, pur essendo definito in modo incompleto, consente tuttavia – per l'applicazione in esame – una valutazione esauriente dell'errore di orientamento, risultando funzionale e versatile. Tale formulazione può risultare interessante per la definizione dell'orientamento in altri tipi di applicazioni, in particolare per un generico organo terminale di un braccio robotico che esegue compiti di manipolazione.

I risultati ottenuti si sono rivelati essere adeguati per le specifiche richieste dall'algoritmo di simulazione cinematica appartenente alla procedura DOPA. Si ritiene inoltre che i metodi mostrati in questo lavoro per l'elaborazione dei dati provenienti dall'analisi sperimentale del movimento possano essere impiegati per la determinazione di traiettorie di riferimento per altri tipi di organi terminali; tali metodi possono quindi essere utili per l'analisi e la sintesi di differenti tipi di macchine o manipolatori.

## Bibliografia

- [1] Troncossi M. (2006). A Procedure for the Synthesis of Upper Limb Prostheses. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Bologna, DIEM.
- [2] Carol A. Stanger et al. (1994), Devices for assisting manipulation: a summary of user task priorities, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 2, No. 4
- [3] Diane J. Atkins (1989), Adult Upper-Limb Prosthetic Training, Comprehensive Management of the Upper-Limb Amputee, New York.
- [4] Anglyn C., U.P. Wyss (2000), Review of arm motion analyses, Proc Instn Mech Engrs Vol 214 Part H
- [5] Romilly D.P. et al. (1994), A functional task analysis and motion simulation for the development of a powered upper-limb orthosis, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 2, No. 3
- [6] McWilliam, B.A. (1970), A list of everyday task for use in prosthesis design and development, Bulletin of Prosthetic Research.
- [7] Buckley M. A. et al. (1996), Dynamics of the upper-limb during performance of tasks of everyday living-a review of the current knowledge base, Proc Instn Mech Engrs Vol. 210
- [8] Mangermans D.J. et al. (2005), Requirements for upper extremity motions during activities of daily living, Clinical Biomechanics Vol. 20, 591-599.
- [9] Safaee-Rad et al. (1990), Normal functional range of motion of upper limb joints during performance of three feeding activities, Arch. Phys.Rehabil. Vol. 71.
- [10] Ramanathan R. et al. (2000), Analysis of arm trajectories of everyday tasks for the development of an upper-limb orthosis, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 8, No. 1
- [11] Murray I.A. (1999), Determining Upper Limb Kinematics and Dynamics During Everyday Tasks. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, UK.
- [12] Anglyn C., U.P. Wyss (2000), Arm motion and load analysis of sit-to-stand, stand-to-sit, cane walking and lifting, Clinical Biomechanics, Vol. 15, 441-448.
- [13] de Jalon J.G., Bayo E. (1994), Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems, Springer, Verlag.
- [14] Da Lio M., Cossalter V., Lot R. (2000), On the use of natural coordinates in optimal synthesis of mechanisms, Mechanism and Machine Theory Vol. 35, 1367-1389.
- [15] Light C.M. et al. (2002), Establishing a standardized clinical assessment tool of pathologic and prosthetic hand function: normative data, reliability, and validity, Arch Phys Med Rehabil Vol. 83.
- [16] Cooper J.E. et al. (1993), Elbow joint restriction: effect on functional upper limb motion during performance of three feeding activities, Arch Phys Med Rehabil Vol. 74.
- [17] Cheng P.L. (2000), A spherical coordinate system for the description of three-dimensional joint rotations, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 28, 1381-1392.



## Appendice A. Filmati INAIL

Di seguito vengono elencati i compiti osservati nei filmati visionati al Centro Protesi dell'INAIL. Entrambi i pazienti sono amputati bilaterali al terzo prossimale e utilizzano protesi mioelettriche attuate su prensione, pronosupinazione del polso e gomito.

### *Paziente 1*

- uso telefono fisso
- scrivere
- apertura porta con chiave
- chiusura finestra
- indossare e appendere camicia
- indossare pantaloni
- versare da bottiglia a bicchiere
- tagliare cibo nel piatto
- falciare erba
- guidare auto e vespa
- preparare caffè
- aprire scatoletta di caramelle
- infilare occhiali
- pulire scrivania
- aprire scatola di medicine e blister
- aprire e chiudere portiera e baule
- fare barba
- allacciare cintura
- infilare calze
- giocare a tennis
- giocare a tennis tavolo
- pulire pesce

### *Paziente 2*

- stappare bottiglia
- versare da bottiglia a bicchiere
- tagliare pane
- uso pinze per insalata
- mettere sapone su spugna
- uso salvietta
- uso spazzolino
- pettinarsi
- allacciare cerniera pantaloni
- uso fazzoletto(dalla tasca)
- mangiare con cucchiaio
- bere da distributore acqua

## Appendice B. Protocollo di acquisizione

### *B.1 Posizionamento degli oggetti*

Gli oggetti che devono essere impugnati sporgenti da un ripiano vengono posizionati in modo che possano essere afferrati correttamente senza spostarli. Sono state raggruppate alcune posizioni particolarmente ricorrenti, lasciando la definizione delle altre al singolo task.

- Sul tavolo:
  - posto centrale: a circa 20 cm dal bordo del tavolo, sul piano sagittale passante per lo sterno.
  - posto laterale: a circa 20 cm dal bordo del tavolo, sul piano sagittale passante per la spalla.
  - posto per afferraggio: l'oggetto è sporgente verso il soggetto, sul piano sagittale passante per la spalla, inclinato di 45 gradi verso l'esterno.

- Posto comune: a circa 30 cm dal bordo, sul piano sagittale passante per lo sterno
- Sul lavandino:
  - l'oggetto è sporgente verso destra, nel ripiano del lavandino a destra del rubinetto.

## ***B.2 Posizionamento dei marcatori***

Di seguito viene indicato per ogni oggetto o segmento corporeo il numero di marcatori impiegati, l'etichetta di ciascuno e, ove anatomicamente definito, la loro precisa collocazione. Le figure B.1, B.2, B.3 e B.4 mostrano e riassumono quanto descritto.

### ***ROM e prove statiche di rilevamento delle misure antropometriche***

- 4, avambraccio destro: RFA1, RFA2, RFA3, RFA4
- 4, braccio destro: RUA1, RUA2, RUA3, RUA4
- 4, su torace:
  - PX (plesso solare)
  - IJ (incavo giugulare)
  - C7 (settima vertebra cervicale)
  - T8 (ottava vertebra toracica)
- 4, testa:
  - H1 (sopra orecchio sinistro)
  - H2 (sopra nuca)
  - H3 (sopra orecchio destro)
  - H4 (sopra fronte)

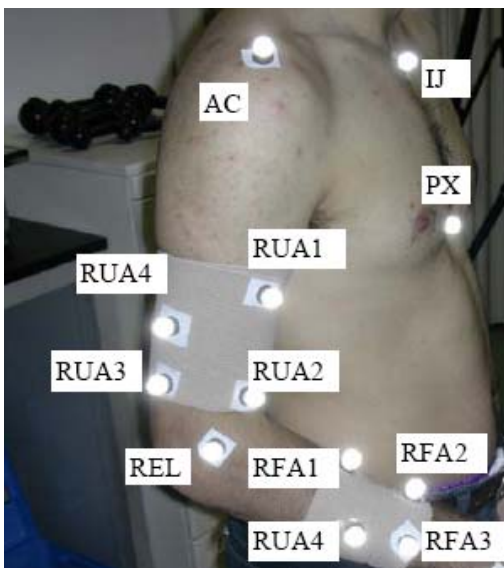
### ***ADL***

- 4, dorso mano destra:
  - RM2D (secondo metacarpo, posizione distale)
  - RM2P (secondo metacarpo, posizione prossimale)
  - RM5D (quinto metacarpo, posizione distale)
  - RM2P (quinto metacarpo, posizione prossimale)
- 4, dorso mano sinistra:
  - LM2D (secondo metacarpo, posizione distale)
  - LM2P (secondo metacarpo, posizione prossimale)
  - LM5D (quinto metacarpo, posizione distale)
  - LM2P (quinto metacarpo, posizione prossimale)
- 4, testa:
  - H1 (sopra orecchio sinistro)
  - H2 (sopra nuca)
  - H3 (sopra orecchio destro)
  - H4 (sopra fronte)
- 4, torace:
  - PX (plesso solare)
  - IJ (incavo giugulare)
  - C7 (settima vertebra cervicale)

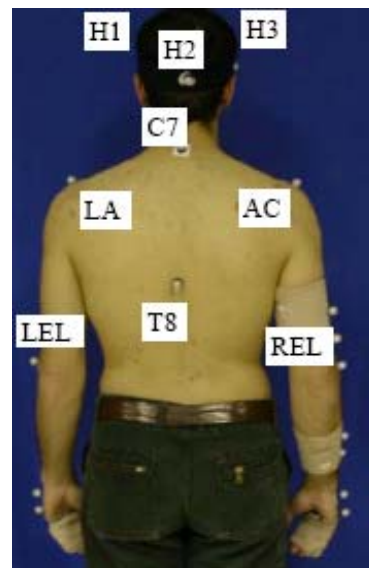
- T8 (ottava vertebra toracica)
- 1, gomito destro: REL
- 1, gomito sinistro: LEL
- 2, acromion destro e sinistro:
  - AC (destro)
  - LA (sinistro)

***Altri marcatori***

- 2, stick, per palpazione:
  - LDIS (distale)
  - LPRO (prossimale)
- 4, L a terra, sempre visibile: G1, G2, G3, G4
- 1, oggetto, se presente: OBJ
- 4, piano di riferimento, se presente: HP1, HP2, HP3, HP4
- 4, mano mioelettrica destra (le etichette assegnate sono le stesse impiegate per la mano destra sana):
  - RM2D (secondo metacarpo, posizione distale)
  - RM2P (secondo metacarpo, posizione prossimale)
  - RM5D (quinto metacarpo, posizione distale)
  - RM2P (quinto metacarpo, posizione prossimale)



**Figura B. 1. Marcatori sul braccio destro e sulla parte anteriore del torace.**



**Figura B. 2. Marcatori collocati posteriormente.**

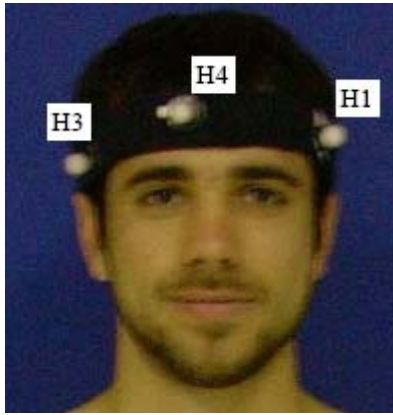


Figura B. 3. Marcatori della testa.

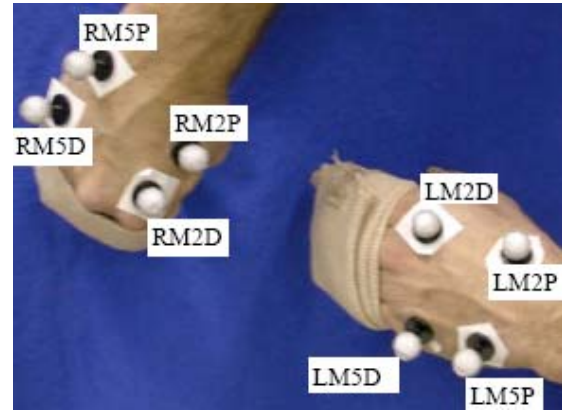


Figura B. 4. Marcatori delle mani.

## Appendice C. Risultati dell'acquisizione

### C.1 Prima elaborazione dei dati

I dati ottenuti dall'acquisizione hanno dovuto essere sottoposti ad una prima elaborazione tramite software Vicon, riassunta nei seguenti passaggi:

- *labeling*: attribuzione di un'etichetta a ciascun marcatore in ogni acquisizione;
- *pulitura*: eliminazione di *ghost* e *phantom*, ovvero degli elementi estranei considerati erroneamente dal sistema come marcatori;
- *ricostruzione*: eliminazione dei *missing*, cioè dei tratti in cui il sistema ha perso la traiettoria dei marcatori; tale procedimento avviene tramite algoritmi di ricostruzione delle traiettorie per mezzo di tecniche di interpolazione o da informazioni ottenute da altri marcatori solidali allo stesso segmento corporeo;
- *filtraggio*: riduzione del rumore nei segnali delle traiettorie derivante da imprecisione del sistema;
- *solidificazione*: ottenimento, per mezzo di un processo di ottimizzazione, di traiettorie coerenti per marcatori solidali ad uno stesso segmento corporeo.

### C.2 Formato dati

**Tabella 8. Esempio del formato dei dati dopo la prima elaborazione: coordinate dei marcatori nel sistema di riferimento solidale all'ambiente.**

Field	LM2P:X	LM2P:Y	LM2P:Z	LM2D:X	LM2D:Y	...
1	-534.48394	-357.92982	853.99533	-573.10358	-374.45825	...
2	-534.59614	-357.74392	853.93754	-573.06716	-374.48697	...
3	-534.70166	-357.56492	853.88513	-573.02991	-374.512	...
4	-534.80046	-357.39285	853.83801	-572.99196	-374.53325	...
5	-534.89248	-357.2277	853.79611	-572.95342	-374.55063	...
6	-534.97768	-357.06949	853.75936	-572.91443	-374.56407	...
...	...	...	...	...	...	...
1047	-494.92041	-377.18988	850.43073	-534.31888	-396.15888	...

Dopo la prima elaborazione i dati si sono presentati nella seguente forma, visualizzata in Tabella 8. Ogni task è rappresentato in un file di testo in cui nella prima riga (header) sono presenti i nomi delle coordinate dei punti di cui si hanno le traiettorie. Ad ogni punto corrispondono tre colonne, una per ogni coordinata (x, y e z), nelle quali è indicata in mm la sua posizione in un sistema di riferimento solidale all'ambiente. Per ogni istante campionato (frame) è presente una riga, numerata in successione nella prima colonna.

## Appendice D. Formato dati delle traiettorie di riferimento

I dati delle traiettorie di riferimento e dei nodi sono stati raccolti in un file dati di Matlab®, più precisamente nella variabile struttura `dDB_T` (Database of Tasks for the dominant arm) contenente i seguenti campi:

- `Name`: è una array di caratteri contenente il nome del *task*;
- `Trajectory`: è una matrice  $9 \times f$ , con  $f$  uguale al numero di fotogrammi, contenente in ciascuna riga una delle nove coordinate cartesiane che individuano i punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , nell'ordine  $P_{1x}$ ,  $P_{1y}$ ,  $P_{1z}$ ,  $P_{2x}$ ,  $P_{2y}$ ,  $P_{2z}$ ,  $P_{3x}$ ,  $P_{3y}$ ,  $P_{3z}$ ; le coordinate, per rendere il risultato il più generale possibile, sono parametrizzate secondo l'altezza del soggetto;
- `Nodes`: è una array di  $n$  strutture, con  $n$  uguale al numero di nodi, contenente il campo `Frame`, in cui compare il fotogramma relativo al nodo in esame, e i cinque campi `Origin`, `OriginAdm`, `Axis`, `AlfaAdm`, `ThetaAdm`, in cui sono definite le classi d'appartenenza rispettivamente di: posizione dell'origine, errore ammissibile per l'origine, asse  $n$ , errore ammissibile per l'orientamento dell'asse  $n$ , errore ammissibile per la rotazione intorno all'asse  $n$ .

Ai campi sopra riportati si aggiungono altri due campi precedentemente definiti per l'impiego delle traiettorie di riferimento all'interno della DOPA:

- `Priority`: indica la classe di priorità a cui è associato il *task*, rappresentata da un numero progressivo da 0 (priorità più alta) a 5 (priorità più bassa);
- `Area`: indica l'area funzionale a cui appartiene il *task*; è rappresentata anch'essa da un numero.

Ad esempio per il *task* "Versare da bottiglia a bicchiere", che è il secondo *task* del `dDB_T`, si ha:

- `dDB_T(2).Name`:

'Versare da bottiglia a bicchiere'

- `dDB_T(2).Trajectory(1, :)`:

$[0.1093 \ 0.7332 \ -0.2585 \ 0.1282 \ 0.7403 \ -0.1848 \ 0.1694 \ 0.7613 \ -0.2206]^T$

`dDB_T(2).Trajectory(2, :)`:

$[0.1091 \ 0.7334 \ -0.2586 \ 0.1282 \ 0.7402 \ -0.1848 \ 0.1694 \ 0.7612 \ -0.2207]^T$

...

`dDB_T(2).Trajectory(170, :)`:

$[0.0905 \ 0.7326 \ -0.2492 \ 0.1218 \ 0.7425 \ -0.1802 \ 0.1530 \ 0.7677 \ -0.2228]^T$

- `dDB_T(2).Nodes(1)`:

<code>dDB_T(2).Nodes(1).Frame</code> :	9
<code>dDB_T(2).Nodes(1).Origin</code> :	1
<code>dDB_T(2).Nodes(1).OriginAdm</code> :	2
<code>dDB_T(2).Nodes(1).Axis</code> :	1
<code>dDB_T(2).Nodes(1).AlfaAdm</code> :	4

- dDB\_T(2).Nodes(1).ThetaAdm: 4
- Priority: 1
  - Area: 0