

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA MÁQUINA POR MEDIDAS ANTROPOMETRICAS

E. PEZZUTI; A. UBERTINI; G. SOLA; P.P. VALENTINI; L. VITA

University of Tor Vergata
Department of Mechanical Engineering
Via del Politecnico, 1
00133 – Roma, Italy
ubertini@ing.uniroma2.it

RESUMEN

La medición de los tamaños antropométricos encuentra empleo en disciplinas médicas, cuales por ejemplo la ortopedia, pero también en otros sectores como la ergonomía, las disciplinas deportivas, el sector del vestuario etc.. Aunque existan manuales por el relieve de los tamaños anatómicos, sin embargo, hasta a ahora, tal operación siempre es desarrollada manualmente por medio de procedimientos no estandarizados; consigue que las medidas tienen errores y no son repetibles. En el mercado son disponibles herramientas de medida, como por ejemplo escáneres láser tridimensionales, pero tienen la desventaja de un precio elevado y la necesidad de empleo por operadores expertos. En este trabajo ha sido diseñado y realizado el prototipo de una máquina barata por el relieve de los principales tamaños antropométricos; paralelamente ha sido desarrollado un software de control de esta máquina, que también tiene la capacidad de memorizar los tamaños medidos y de conducir el operador en todas las fases de la medida. El sistema además tiene la posibilidad de medir el cuerpo en su entera y también un solo miembro y es conectada por otros programas, desarrollados por los autores, para construir modelos 3D del cuerpo humano por medio de los datos adquiridos.

Palabras clave: relieve de los principales tamaños antropométricos, modelos 3D del cuerpo humano.

ABSTRACT

The measuring of human body has many applications in medical field, like orthopaedics, in the ergonomic studies, in the planning of sport equipment, etc. The measurement operations are usually performed manually by means of non-standardized procedures which can be affected by errors and they can't be easily repeated. Many sophisticated measurement devices are available, but they are very expensive; they are based on three dimensional scanner system and require specialized personnel to be used. In this paper a low cost prototype to measure the principal anthropometric parameters has been designed. Moreover, a dedicated control software has been implemented too. This code can help the user during measurement and

automatically stores the acquired data. The whole system can be used to measure the entire body dimensions and it can be linked to other simulation software developed at the authors' University in order to reproduce an accurate three dimensional model of the human structure.

Key words: antropometrics, design of a measurement device.

1. Introduzione

Il rilevamento delle grandezze caratteristiche del corpo umano come le misure segmentali e i diametri corporei, presenta delle difficoltà oggettive. Il corpo umano, infatti, non essendo un corpo rigido e nemmeno un corpo costituito da materiale uniforme, rende difficile l'individuazione univoca dei punti caratteristici per le misurazioni. Tali punti, detti punti di repere, sono individuati, a seconda del tipo di misura, nella norma UNI EN ISO 7250. Tale norma indica anche il tipo di strumenti che devono essere utilizzati per il reperimento di ciascuna grandezza corporea. Gli strumenti, attualmente in uso, sono il centimetro per le lunghezze segmentali e il calibro per le circonferenze. In letteratura si trovano tecniche di misura particolari come il sistema Doxa che permette di studiare con precisione ogni la densità di ogni tipo di tessuto nel corpo, quindi anche il tessuto osseo. Di contro, però, c'è il fatto che il soggetto sottoposto a misura viene sottoposto a raggi X. Un altro esempio, è l'Armyfit[®] basato sull'utilizzo di uno scanner tridimensionale che acquisisce il soggetto da due lati opposti. Successivamente, la macchina genera il modello solido virtuale in scala 1:1 del soggetto misurato. Tali strumentazioni di misura vengono utilizzate in campi molto particolari con tutte le limitazioni che possono comportare sia dal punto di vista del paziente sia da quello del personale tecnico che le deve usare. Si richiede, infatti, a tale personale una specializzazione elevata ed inoltre questi sistemi di misura hanno un prezzo elevato. I suddetti motivi ne limitano la diffusione a settori particolari. Si è pensato quindi di progettare e realizzare uno strumento che permettesse il reperimento delle misure in maniera abbastanza semplice, senza la necessità di operatori specializzati, che non fosse dannoso per il paziente da misurare e, non ultimo, che avesse un costo di realizzazione basso in modo da renderlo di ampia diffusione in ambienti come le officine ortopediche e gli studi ambulatoriali. Si è realizzato un braccio antropomorfo, passivo, ovvero attuato dall'operatore di misura. Il braccio di misura è dotato, all'interno dei suoi giunti, di encoder rotazionali che registrano la posizione relativa dei vari link. Gli encoder sono collegati ad una scheda di acquisizione che permette, via software, l'elaborazione dei dati da questi provenienti. In questo modo, una volta aver posizionato l'end-effector del braccio meccanico sui punti di repere del paziente, corrispondenti alla misura da rilevare, si avrà calcolata la distanza tra questi due punti e quindi la misurazione. Infatti, il sistema deve poter essere ripiegato su stesso in modo da occupare lo spazio minimo quando non utilizzato. Si è voluta quindi realizzare una struttura compatta e maneggevole tale da poter essere impiegata facilmente in ambienti sanitari. Le operazioni matematiche sono svolte dal software che tramite la ricostruzione della catena cinematica del sistema di misura, e quindi delle posizioni assunte dai link nello spazio, determina le coordinate dei punti di repere e poi ne calcola la distanza. Così si ottiene la misura in oggetto e può essere memorizzata in un opportuno database. Il software, inoltre permette, la registrazione delle misure per ogni paziente, creando per

ognuno un record in un database, in modo che i dati di ogni singolo paziente siano di facile gestione e consultazione. L'interfaccia con l'utente è stata realizzata in modo da risultare di facile e immediato utilizzo. Inoltre, il software è stato sviluppato per essere utilizzato sulle comuni piattaforme PC. Le applicazioni di una strumentazione integrata di questo tipo, sono molteplici. Con l'attualità della scienza che studia l'interazione tra l'uomo e la macchina si rende necessaria l'esigenza di standardizzare e personalizzare gli ambienti e gli strumenti a diretto contatto con il corpo umano; l'abitacolo di un veicolo, l'ambiente di lavoro manuale, la postazione di lavoro, l'ergonomia degli strumenti di lavoro e per lo sport.

2. Descrizione del modello

Il sistema di misura realizzato, fig.1, è costituito da un braccio meccanico antropomorfo corredato da un software per la gestione sia delle misure effettuate sia del database di soggetti misurati, SOLA (2003). Il braccio di misura è costituito da segmenti rigidi chiamati link, di forma tubolare, collegati tra loro da giunti di rotazione. Il misuratore si presenta in forma compatta e con un peso limitato adatto per la movimentazione manuale. L'operatore, infatti, può muovere il braccio di misura fino a portare a contatto l'end-effector con i punti di reperi del soggetto da misurare. All'interno di ciascun giunto del braccio meccanico sono montati degli encoder rotazionali che permettono la ricostruzione della posizione assunta dai vari segmenti del braccio durante la misurazione. Il segnale proveniente dagli encoder è trasmesso ad una scheda di acquisizione montata su un PC. Tramite il software di gestione viene ricostruita la catena cinematica del sistema di misura meccanico, e di conseguenza, vengono identificate le coordinate spaziali dell'end-effector e quindi quelle del punto di reperi. Ogni singola misurazione è gestibile via software. Questo ultimo, infatti, è stato pensato in modo da poter guidare l'operatore nelle singole operazioni, catalogate seguendo la normativa vigente.

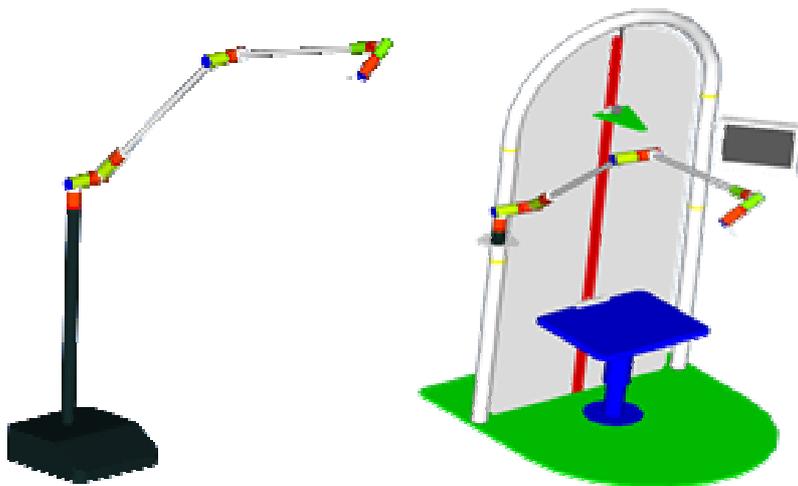


Figura 1. Il modello CAD del braccio antropomorfo e della stazione di misura

A differenza degli attuali strumenti adottati per le misurazioni antropometriche, un sistema così fatto permette la ripetibilità delle misurazioni con un errore limitato, garantendo una precisione maggiore. Nei successivi paragrafi si andranno a descrivere in dettaglio le caratteristiche del braccio antropomorfo e del relativo software.

2.1. Il braccio antropomorfo

Il braccio, fig. 1, è costituito da 7 segmenti, link, collegati da 6 giunti, nel cui interno sono montati degli encoder rotazionali che ne rilevano l'assetto relativo. Ogni coppia giunto-link, rappresenta un grado di libertà. Il sistema di misura, essendo costituito di 6 coppie giunto-link, ha 6 gradi di libertà. Il link 0, non considerato parte del braccio, è ancorato a una base di appoggio. Proprio nel link 0 è stabilito un sistema di coordinate inerziale; all'ultimo link è collegato un tastatore, l'effettore. I giunti e i link sono numerati in successione partendo dalla base; così il giunto 1 costituisce il punto di connessione fra il link 1 e la base di supporto e a seguire. I giunti sono tutti delle cerniere. Utilizzando la matrice di Denavit – Hartenberg, PENNESTRI' (2002) e VALENTINI (2003), è possibile trasformare le coordinate da un sistema di riferimento all'altro.

$$[T]_i^j = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & -\cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

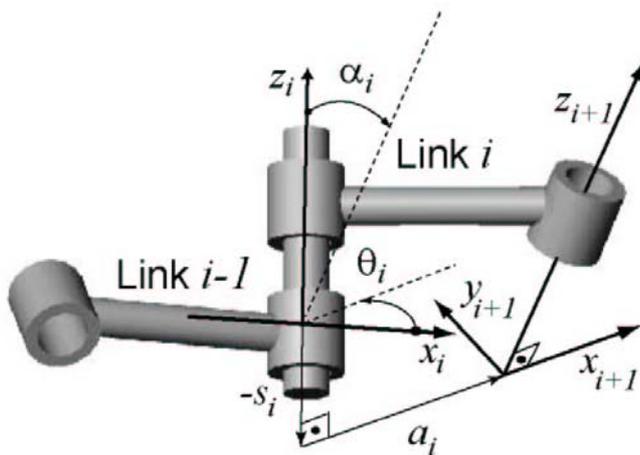


Figura 2. Nomenclatura della matrice di Denavit – Hartenberg

Questa è una matrice di trasformazione omogenea ${}^{i-1}T_i \in \mathbb{V}^{4 \times 4}$ che rappresenta il sistema di coordinate del link i rispetto al riferimento del link precedente $i-1$. La rappresentazione grafica delle grandezze che compaiono nella matrice è riportato nella

fig. 2. Il parametro α_i esprime l'angolo tra gli assi z_{i-1} e z_i , mentre il parametro a_i la minima distanza tra i due assi. Il movimento angolare tra i membri i e $i-1$ è indicato tramite l'angolo θ_i .

Pertanto, attraverso opportune trasformazioni, le coordinate dell'effettore, possono essere espresse rispetto al sistema di riferimento inerziale del questo sistema dinamico.

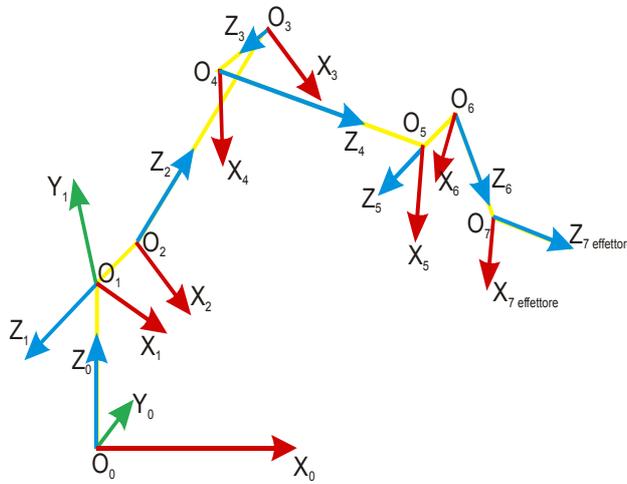


Figura 3. Sistemi di riferimento del braccio

In particolare, in fig. 3, è riportata la nomenclatura relativa al nostro caso. Per ogni posizione assunta dal sistema di misura è quindi possibile determinare le coordinate dell'end-effector. Di conseguenza le coordinate del punto di repera vengono calcolate dal software, e visualizzate nel form corrispondente. I vari encoder montati all'interno dei giunti inviano il segnale alla scheda di acquisizione, Sensoray 626, che traduce l'informazione nelle rotazioni relative tra i singoli tratti. I giunti, e quindi i link, sono stati progettati in modo di poter accogliere al loro interno il passaggio dei fili che collegano ciascun encoder con la scheda di acquisizione. Si è inoltre tenuta particolare attenzione nel prevedere delle particolari griglie per l'uscita dei fili degli encoder dai giunti, in modo tale che i fili non si intreccino durante la movimentazione del braccio. Il funzionamento del braccio meccanico si basa sul reperimento delle coordinate del punto di repera tramite il posizionamento su questo ultimo dell'end-effector. Per raggiungere tale scopo, l'utente, movimentando l'end-effector, determina una variazione di assetto dei link della catena cinematica del sistema. I giunti e i segmenti dello strumento di misura sono stati realizzati in Alluminio Anticorodal in modo da rendere la strumentazione particolarmente leggera e quindi adatta alla movimentazione manuale. All'interno dei giunti sono state montate delle frizioni in Delrin per evitare l'utilizzo di cuscinetti che avrebbero apportato un maggiore ingombro radiale e di conseguenza maggior peso. La configurazione scelta del braccio garantisce una condizione di minor peso all'operatore. Infatti, tre dei 6 giunti sono sulla base e quelli movimentati dall'operatore hanno dimensioni inferiori e quindi minor peso; il giunto a sbalzo è sorretto da frizioni. Inoltre, ogni giunto ha dei fine

corsa che impediscono una rotazione superiore a 360° che potrebbe intrecciare i cavi elettrici di controllo dei sensori. Queste caratteristiche consentono all'operatore un'agevole movimentazione e fanno sì che il braccio rimanga, se non utilizzato, nell'ultima posizione assunta. Inoltre, forniscono una posizione certa di configurazione del meccanismo che consente un facile reset dei sensori incrementali, individuando così la funzione di Home del braccio di misura. Tale posizione corrisponde a quella per cui si minimizza l'ingombro.

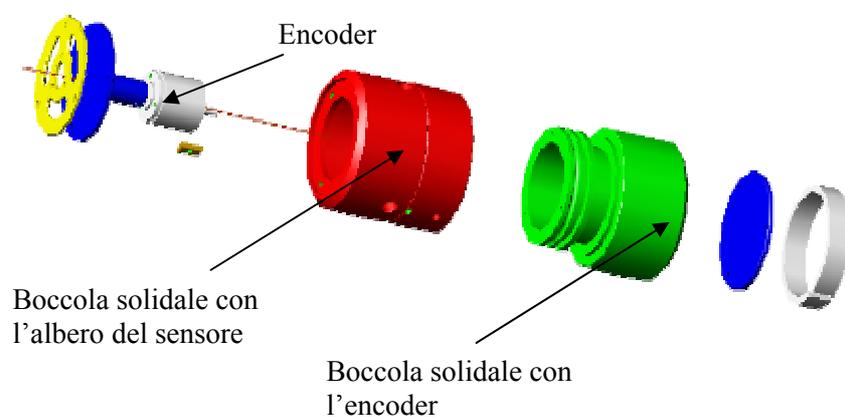
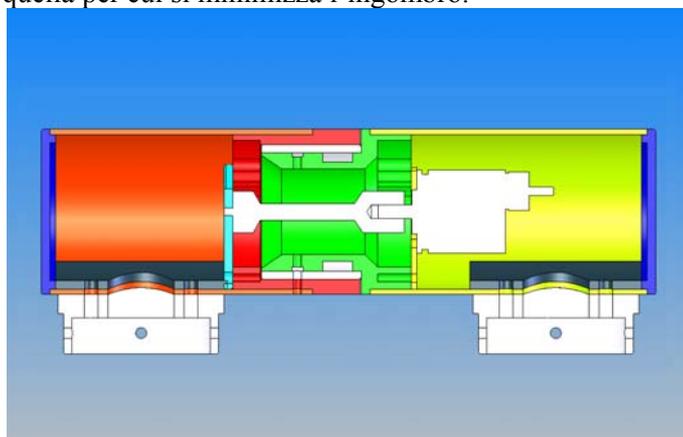


Figura 4. Particolari del giunto

All'interno dei giunti gli encoder sono montati in posizione assiale, fig. 4. Si è, inoltre, provveduto a realizzare un alloggiamento adeguato per i loro cavi arrivando ad un ingombro massimo radiale di 60mm. L'ingombro assiale di ogni singolo giunto dipende dalla necessità di decentrare l'encoder per consentire il passaggio dei cavi con una sezione inferiore, lasciando adeguati spazi per evitare la possibilità di intreccio. In fig. 4 sono evidenziati i due gruppi in movimento relativo. L'albero dell'encoder è collegato rigidamente, mediante un grano, ad un secondo albero opportunamente lavorato, ed alla boccola femmina con una piastra svasata a 'ragno'. Le due boccole assorbono anche la sollecitazione di flessione del giunto e ne consentono il moto rotatorio relativo. Fra i due giunti, come cuscinetto è stata inserita una boccola di Delrin; tale scelta è motivata dalle basse velocità e limitate rotazioni del giunto,

nonché dalla necessità di contenere i pesi, condizioni che hanno sconsigliato l'impiego di cuscinetti volventi, peraltro anche eccessivamente ingombranti. Oltre al dimensionamento ed al calcolo di verifica di tutti i componenti, è stato valutato, mediante un algoritmo appositamente sviluppato, anche il volume di spazio raggiungibile dal braccio, in modo da verificare la possibilità di effettuare tutte le misurazioni necessarie. Solo due link non sono integrati nei giunti. Entrambi sono stati realizzati in un tubolare di alluminio di diametro esterno 30 mm e spessore 3 mm, avvitati e bloccati con un grano alle basette che li agganciano ai giunti. Il modello di encoder scelto è del tipo *Baumer* miniaturizzato che garantisce caratteristiche di compattezza, leggerezza e un numero di impulsi e passi encoder tale da assicurare una buona precisione.

2.2. Realizzazione del prototipo

Il prototipo del sistema di misura, fig. 5, è stato, come detto, progettato all'interno della Cattedra di Disegno di Macchine dell'Università di Roma Tor Vergata ed è stato successivamente realizzato in collaborazione con le officine Metalbrico di Roma. La scelta del materiale è stata diversificata tra giunti e segmenti. Per i giunti è stato scelto un Anticorodal o duralluminio per le sue caratteristiche di lavorabilità e di peso. Infatti, la scelta dell'alluminio nelle lavorazioni di asportazione di truciolo non è ottimale, perché il truciolo si rompe in scaglie e impasta l'utensile, rendendo la lavorazione complessa con possibilità di rovinare il pezzo, mentre il duralluminio genera un truciolo continuo e la lavorazione risulta più rapida e sicura. I segmenti sono stati realizzati anche loro in alluminio ma di una lega Peralluman. La scelta è ricaduta su questa lega perché le lavorazioni sui segmenti si limitano a delle filettature interne. Il collegamento a terra fino alla base del sistema di misura, che geometricamente non fa parte del braccio, è in tubolare di acciaio inossidabile AISI 304 X2Cr Ni Mn 19 10. Il basamento, di peso elevato, è in ferro con piedini di appoggio in ottone.



Figura 5. Il prototipo e alcuni particolari

Le guarnizioni e le frizioni sono state fatte in Derby, viscoso e tenace, dopo aver effettuato delle prove con il PVC e in ottone da orologeria. Il primo è risultato troppo cristallino e consumabile, il secondo troppo pesante. In ottone OT 58 sono stati

realizzati i dilatatori per le due frizioni del braccio antropomorfo. Le frizioni di minor impegno frenante sono O-ring opportunamente dimensionati. Nella realizzazione del prototipo è stata fatta particolare attenzione al complesso di insieme. Infatti, i collegamenti filettati a vista sono stati realizzati in acciaio inossidabile.

2.3. Il software di gestione

Il software di gestione, fig. 6, è stato in sviluppato in Visual Basic in modo da poter creare un'interfaccia utente di tipo *user friendly* tale da facilitare le operazioni di misura e gestione del database. Mediante tali finestre è possibile visualizzare in *real time* i valori misurati ed inoltre l'operatore viene guidato *step by step* in tutte le diverse fasi del processo di misura. La schermata iniziale prevede l'inserimento dei dati anagrafici del soggetto da misurare. Le varie fasi sono organizzate secondo una sequenza logica ed intuitiva: dalla schermata iniziale, con l'inserimento dei dati anagrafici del soggetto da misurare, viene creato un file record in un database, in modo che le misure siano reperibili per un controllo successivo o per un aggiornamento, come ad esempio per un individuo in crescita. L'utilizzatore può in questo menu scegliere quali misure effettuare sul soggetto misurato. I gruppi delle misurazioni sono quelli riportati di seguito e seguono le indicazioni della norma UNI EN ISO 7250: *Tutto il corpo, Arti Superiori, Arti Inferiori, Tronco e Testa, Diametri Scheletrici, Misure Funzionali, Misure di Volume, Morfologiche Somotipali, Misure Singole, Misure Libere*. Ciascuna scelta implica l'apertura di un form specifico, tranne nel caso corrispondente alla voce *Misure Libere*, con il quale è possibile usare il braccio antropomorfo come se fosse un misuratore qualsiasi. Per ciascuna misura, sullo schermo sono visualizzate le coordinate del punto dell'effettore e la distanza tra due punti. Infatti, una volta individuato il punto di reperi, l'utente può registrare le relative coordinate tramite la pressione del primo dei due tasti presenti sull'end-effector.

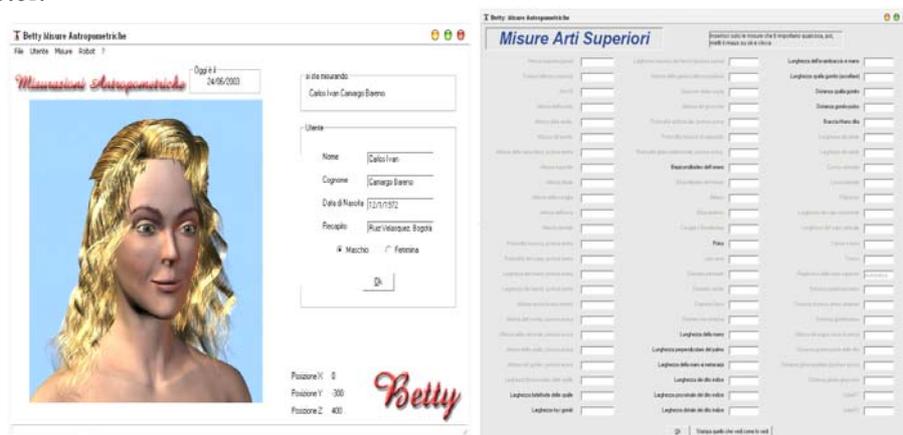


Figura 6. Schermata del software

Seguendo lo stesso procedimento, ma premendo il secondo tasto sull'end-effector, si memorizzano le coordinate del secondo punto di reperi. Dopo l'immissione di questi dati di input, il software calcola la misura antropometrica di interesse, memorizzandola nell'apposito record del database. Ogni misura è individuata da un

proprio numero identificativo, ID, che viene richiamato all'interno delle routine del software. Inoltre, per minimizzare il rischio di errore da parte dell'operatore, in ciascun form è stata inserita figura rappresentava il tipo di misura che si andrà ad acquisire, fig. 7. Inoltre le misure rilevabili sono state scelte in accordo, oltre che con la normativa precedentemente citata, con il principali manuali di standardizzazione e misurazione antropometrica, TIMOTHY et al. (1997) e RUSSE et al. (1980). Le finestre inoltre segnalano graficamente, oltre ai punti da rilevare, anche la postura che il soggetto deve assumere durante la misurazione; per ogni misura da effettuare quindi è stata realizzata un'immagine che rappresenta il soggetto o il particolare arto, nella postura corretta ed i punti da toccare con il tastatore per effettuare il rilievo. E' possibile inoltre rilevare le misure scheletriche. Come già accennato, nel software è implementata la matematica per la ricostruzione della cinematica inversa, necessaria per la determinazione delle posizioni assunte dal puntatore del braccio.

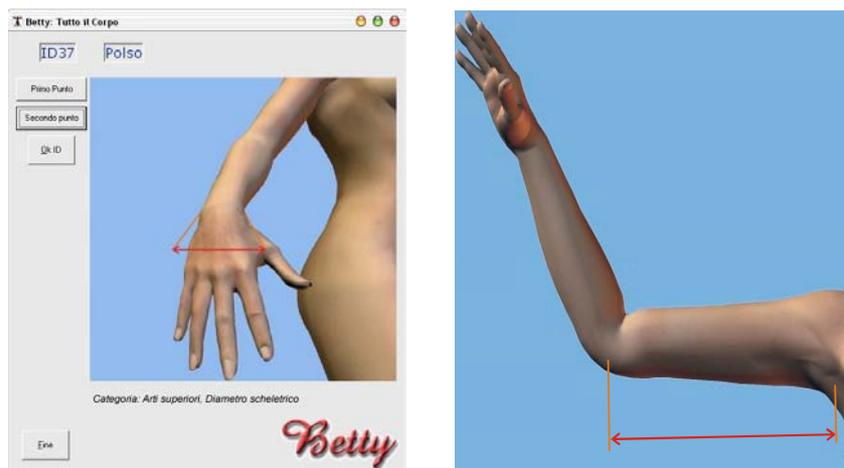


Figura 7. Finestra grafica per l'immissione di una misura antropometrica

Una volta registrate le misure antropometriche del soggetto in esame queste sono messe a disposizione della routine *Somotipi6* che individua, secondo delle lunghezze caratteristiche, la tipologia di persona più prossima a quella misurata secondo la catalogazione presente nella letteratura. Inoltre, è stato generato un protocollo di comunicazione tra questo software e il software HuMAN, PEZZUTI et al. (2002), in modo da poter costruire il modello virtuale del soggetto misurato. Infatti, una volta disponibili le misure antropometriche tramite il sistema di misura fin qui descritto, HuMAN realizza il corrispondente modello in un software di tipo *multibody*. In questo modo è possibile dedicare il modello virtuale alla riproduzione e analisi del movimento, con la relativa misurazione delle forze. Inoltre, lo stesso modello può essere utilizzato per la costruzione di apparati dedicati, come l'allestimento di abitacoli di autovetture per disabili. Con riferimento allo stato attuale, si prevede per l'attrezzatura un costo di produzione oscillante fra i 3500 e i 4500 euro, scheda di acquisizione compresa, più il costo di un personal computer in configurazione standard. E' evidente che i costi sono sensibilmente influenzati dai volumi di produzione. Per numeri elevati è prevedibile una sensibile riduzione degli stessi.

3. La taratura della macchina

Il sistema realizzato è stato tarato mediante l'impiego di una piastra con markers realizzati mediante macchine a controllo numerico, con precisione del centesimo di millimetro. Nella varie misure il sistema ha mostrato, oltre la ripetibilità delle rilevazioni, errori massimi sempre inferiori al centimetro, valore questo ottimale per il campo di applicazioni cui è destinato il sistema. Inoltre sono stati rilevati dei soggetti, di sesso sia maschile che femminile, e sono stati costruiti i modelli CAD dei soggetti misurati mediante di software HuMan sviluppato da alcuni degli autori. Tali misure hanno confermato la validità del sistema realizzato

4. Conclusioni

E' stata ideata e progettata una macchina per misure antropometriche a basso costo. Della stessa ne è stato realizzato un prototipo completamente funzionante. Parallelamente è stato sviluppato il software per il controllo completo del sistema, che consente inoltre di gestire il database dei pazienti, memorizzare ed elaborare i dati acquisiti e guidare l'operatore nelle varie fasi della misura. Particolare attenzione è stata posta nel realizzare un sistema di rapido e facile impiego che ne consenta l'utilizzo anche a persone senza particolari competenze tecniche. La facilità d'impiego, i volumi di ingombro, la precisione delle misure effettuabili e non ultimo il costo produttivo ne consentono l'impiego non solo in officine ortopediche specializzate, ma anche in ambulatori ed in settori affini quali il biomeccanico, studi ergonomici, medicina sportiva ed anche settori non medicali, quali ad esempio quello sartoriale. Il software è predisposto per l'interfacciamento con altri programmi sviluppati dagli autori che consentono, sulla base delle misure effettuate, la creazione di modelli 3D CAD del corpo umano utilizzabili in analisi di tipo multibody e nello sviluppo di modelli vibrazionali. L'integrazione di tali algoritmi, oltre che l'affinamento e il miglioramento dei componenti, sarà oggetto di sviluppi futuri.

Bibliografia

PENNESTRI', E. *Dinamica tecnica e computazionale*, Casa ed. Ambrosiana, 2002.

PEZZUTI, E., et al, *Modelizzazione CAD 3D del cuerpo humano y aplicacion para l'analisi del movimento*, XIV Congresso INGEGRAF, 2002.

RUSSE O. A., et al., *Semiotica e diagnostica ortopedica*, Edizione Aulo Gaggi Editore, Bologna 1980.

SOLA, Giorgio *Progettazione e Realizzazione di un Sistema Integrato per Misure Antropometriche*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, 2003.

TIMOTHY G., et al. *Manuale di riferimento per la standardizzazione antropometrica*, Edizione EDRA Medical Publishing & New Media, Milano 1997.

VALENTINI, P.P., et al. *Control and virtual reality simulation of tendon driven mechanism*, IDMEC/IST, Lisbon, Portugal, 2003.