

QUADERNI delle ESERCITAZIONI

Quaderno 1

a cura di Francesca Nardello e Luca Ardigò

INDICE

1) SISTEMA di ACQUISIZIONE del MOVIMENTO	p. 4
2) MOTO PARABOLICO di una PALLINA	p. 21
3) LANCIO VERTICALE: MOTO di un BASTONCINO	p. 30
4) ACQUISIZIONE di una PROVA STATICA	p. 48
5) CINEMATICA della LOCOMOZIONE	p. 50
6) DINAMICA dei SALTI sul POSTO	p. 56

1 SISTEMA di ACQUISIZIONE del MOVIMENTO

1.1 I SISTEMI OPTOELETTRONICI

1.1.1 Introduzione

L'analisi del movimento umano si propone di rilevare e quantificare il movimento dei segmenti corporei per misurare grandezze cinematiche e dinamiche (per es. angoli articolari nelle diverse direzioni e attorno diversi assi; momenti e forze trasmessi). L'elemento centrale di un laboratorio del movimento può essere ben rappresentato dal sistema di acquisizione del movimento stesso (*motion capture system*). Nella maggior parte dei casi si tratta di sistemi *optoelettronici* che fanno uso di marcatori (*marker*), di dimensione differente, posizionati su punti di *reper* anatomici (di solito in corrispondenza di strutture articolari), i movimenti dei quali vengono registrati automaticamente e digitalmente.

Il sistema di *motion capture* in dotazione presso il laboratorio di Biomeccanica della Facoltà di Scienze Motorie dell'Università di Verona (SSMM-UNIVR) è un **Vicon MX System**.

Esso funziona comandato da un pacchetto software *ad hoc*. In particolare, è possibile utilizzare l'applicazione **Workstation 5.1**, installata su di un personal computer. Essa consente di 'catturare' il movimento, analizzarlo per diversi aspetti e presentare risultati in tempi brevi.

1.1.2 Categorie di sistemi optoelettronici

In generale, i sistemi optoelettronici possono essere distinti in:

- a) sistemi a marker attivi;
- b) sistemi a marker passivi con riconoscimento a soglia; e
- c) sistemi a marker passivi con riconoscimento di forma.

La prima categoria, oggi poco utilizzata, prevede sistemi caratterizzati da una serie di emettitori (solitamente *diodi fotoemittitori*) che possono essere fissati sui punti di *reper*. I

diodi vengono accesi simultaneamente o in sequenza (caso, questo, che permette una migliore identificazione dei diversi punti di riferimento).

Un sistema con riconoscimento solo a soglia si limita a restituire le coordinate dei punti dove il segnale supera un certo valore di soglia, il che può portare a problemi qualora vi siano sorgenti luminose oltre ai marker.

Un sistema con riconoscimento anche di forma, invece, opera una elaborazione del segnale, riconoscendo oggetti di forma predeterminata (ad esempio, l'emisfera o la sfera completa del marker). La forma del marker ne guida il riconoscimento e la sensibilità della camera lo permette. Grazie ad algoritmi di calcolo sviluppati ad uopo, la posizione tridimensionale dei marker viene in un secondo momento ricostruita e digitalizzata.

1.2 VICON MX SYSTEM

1.2.1 Telecamere MX

I principali elementi costituenti il sistema sono le otto camere MX13 coassiali a raggi rossi (figura 1.1). Per ciascuna di esse esiste la possibilità di regolazione dell'apertura del diaframma e della posizione del fuoco in base alle condizioni di luminosità e della distanza dall'oggetto di studio.



Figura 1.1: camere MX13.

Le loro principali caratteristiche sono riassunte in Tabella 1.1 .

PERFORMANCE	CAMERA MX13
Resolution (pixel)	1280 x 1024
Maximum Frame Rate (fps) at full resolution	482
Aspect Ratio	5:4
Sensor size (megapixel)	1.3

Sensor size (mm)	15.4 x 12.3
Shuttered	Yes
Sensor Type	CMOS
VGA Monitor Mode	60 kHz x 50 kHz

Tabella 1.1: caratteristiche principali delle telecamere MX13.

Attorno ad ogni telecamera sono disposti in maniera circolare su di un apposito supporto degli illuminatori costituiti da *led a luce rossa* che hanno la funzione di illuminare il volume di analisi con lampi di luce rossa, debolmente visibile ad occhio nudo, che viene poi riflessa dai marker e ri-acquisita dalle telecamere stesse. Un altro singolo led di colore giallo indica che la camera selezionata non è utilizzata nel dato momento; un secondo singolo led di colore blu indica la possibilità in essere di modificare le principali regolazioni della telecamera stessa (per es. *Threshold, Strobe, Gain, Circularity* e cioè possibili regolazioni via software riguardanti ottica e visualizzazione e ricostruzione della posizione dei marker). Infine, un terzo ed ultimo singolo led di colore verde indica che la telecamera selezionata è pronta per l'acquisizione.

Le telecamere sono sostenute da otto tripodi telescopici (modificabili nelle loro altezze ed inclinazioni) sopra i quali vengono posizionate e puntate verso il volume di lavoro (*capture volume*). Infine, otto cavi assicurano alimentazione e comunicazione con il box di acquisizione.

1.2.2 Unità MX

Le unità modulari MX sono:

- a) MX UltraNet (2 unità; figura 1.2): fornisce la potenza e la comunicazione per ciascuna delle otto telecamere connesse; ed
- b) MX Control (1; figura 1.2): serve qualora siano presenti anche altri sistemi di registrazione, sia digitali e sia analogici, quali per es. altri sensori digitali, sistemi elettromiografici e piattaforme dinamometriche. Inoltre, è responsabile della sincronizzazione temporale dei diversi segnali.



Figura 1.2: MX UltraNet (2) e MX Control (1).

1.2.3 Kit di calibrazione MX e marker

Kit di calibrazione MX e marker consistono in:

- a) *L-Frame* (figura 1.3);
- b) strutture *Wand* di diverse dimensioni (figura 1.3); e



Figura 1.3: L-Frame ed asta Wand (240 mm) usata nella fase di calibrazione dinamica.

c) marker di differenti dimensioni, rifrangenti con supporto in plastica all'estremità inferiore per applicazione di nastro biadesivo per fissare il marker a punti di repere anatomici (centri di rotazione delle articolazioni, determinati punti anatomici od estremità di segmenti in generale; figura 1.4). I marker in dotazione sono detti *passivi* in quanto consentono solamente di riflettere la luce rossa emessa dagli illuminatori delle telecamere. Inoltre, essendo utilizzati di volta in volta tutti uguali tra loro per forma e dimensione, non è possibile distinguerli l'uno dall'altro. Ciò implica che la ricostruzione della traiettoria di ciascun marker è possibile solo a posteriori tramite la funzione *Labeling*, inclusa nel software Workstation 5.1. In commercio, esistono però – come si è già detto a proposito di sistemi di motion capture di tipo diverso – anche marker *attivi* costituiti da dispositivi in grado di inviare segnali radio o dotati di appositi led di differenti colori.

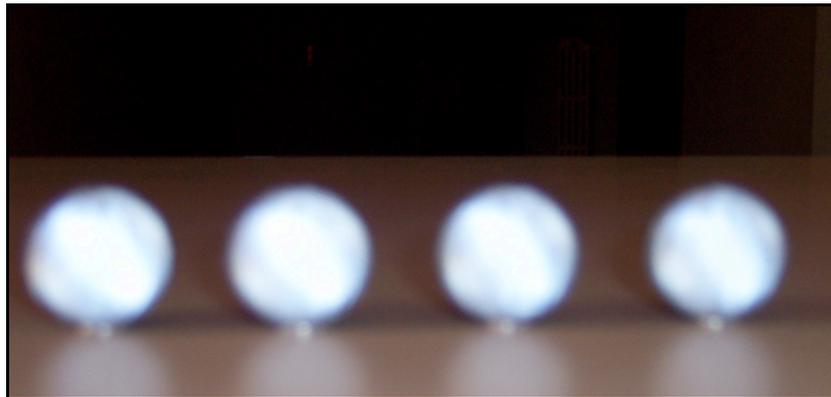
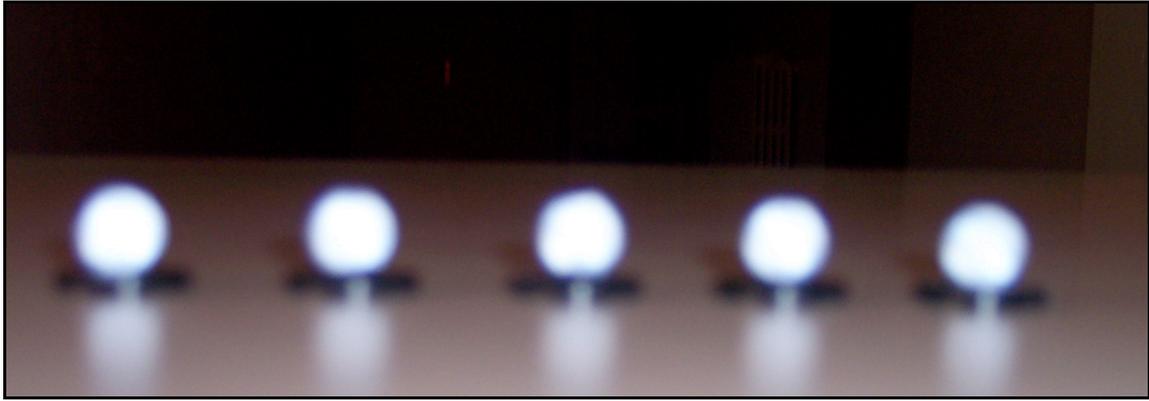


Figura 1.4: marker da 14 (a sinistra) e 25 mm (a destra).

1.2.4 PC MX

È necessario un personal computer sufficientemente potente con installato il software specifico per acquisizione, elaborazione, ricostruzione, salvataggio ed esportazione dei dati. Applicazioni del software Vicon MX sono: Workstation 5.1, Vicon IQ 2.X, Body Builder, Polygon e Tracker 2.X.

1.3 COORDINATE di un PUNTO nello SPAZIO

1.3.1 Introduzione

Per determinare le coordinate tridimensionali di un punto nello spazio si devono avere almeno due punti di vista distinti. Ovvero, ciascun marker posizionato nel volume deve essere visto da almeno due telecamere. Il calcolo delle coordinate tridimensionali del marker richiede molti calcoli matematici, attualmente velocemente permessi dai moderni calcolatori.

Disponendo dell'immagine video bidimensionale di un marker da almeno due punti di vista è possibile ricostruirne la posizione istante per istante (*frame by frame*). Si tratta della fase di associazione di singoli - ma ancora *anonimi* - marker a specifici estremi di un modello segmentale scelto (*Labeling*). Per es. si associa ciascun marker ad un corrispondente riferimento anatomico dopo aver selezionato un dato modello corporeo segmentale. A questo livello, è inoltre già possibile ottenere prime misure di semplici variabili cinematiche. Per mezzo di calcolo algebrico, successive derivazioni, dalla posizione tri-dimensionale nel tempo dei marker se ne calcola spostamento, velocità ed accelerazione anche durante movimenti rotatori.

1.3.2 Capture volume

L'applicazione Workstation 5.1 permette di utilizzare un algoritmo di calcolo che, in base alla minimizzazione dell'errore possibile teorico, consente di generare un volume di calibrazione (*capture volume*), all'interno del quale verranno rilevati i segnali delle telecamere nella successiva fase di acquisizione, mentre verranno trascurati ed esclusi dall'elaborazione tridimensionale della posizione dei marker tutti i segnali provenienti dall'esterno, considerati fonte d'errore. La calibrazione consente di creare una precisa corrispondenza biunivoca tra il volume reale dove

successivamente si acquisirà ed un volume virtuale digitale. La posizione delle telecamere influenza sia il volume di calibrazione e sia la precisione dell'intero sistema. Tale precisione dipende anche dall'accuratezza con la quale viene effettuata la procedura di calibrazione.

1.4 DISPOSIZIONE delle TELECAMERE

1.4.1 Nozioni generali

In generale, nella scelta della disposizione delle telecamere è buona regola seguire i seguenti consigli:

- *puntare gli obiettivi verso il basso con un angolo sull'orizzontale di almeno 15° per evitare che una telecamera capti i lampi emessi dagli illuminatori rossi di altra/e telecamere;*
- *se tutte le telecamere puntano verso l'L-Frame, si ottiene la massima precisione al prezzo di una riduzione del volume di calibrazione;*
- *se si aumenta l'altezza delle telecamere, s'ingrandisce il volume di calibrazione e si riduce la probabilità che due telecamere siano esattamente agli antipodi rispetto ad un marker. Per contro, si aumenta la probabilità che i marker posti più in basso non siano visibili perché coperti da alcune parti del soggetto; e*
- *per un'acquisizione di entrambi i lati del soggetto, è preferibile una disposizione simmetrica. Se invece ci si vuole focalizzare su un solo lato, è consigliabile una diversa disposizione, garanzia di un maggior dettaglio.*

Per ridurre l'errore dovuto alla non linearità spaziale, è preferibile disporre le telecamere ad ottagono regolare. Esse misureranno la stessa distanza dal suolo e tutti gli obiettivi saranno puntati verso il centro dell'ottagono. In tale configurazione, il volume ideale calibrato risulterebbe quasi una sfera appoggiata sull'origine, nella quale l'errore aumenterebbe allontanandosi dal centro, pur rimanendo accettabile finché all'interno del capture volume.

1.4.2 Disposizione delle telecamere

Si sono utilizzate tutte le telecamere MX13 del Vicon System. Esse vengono disposte come mostrato in figura 1.5, dunque a forma di ottagono regolare, ossia a forma corrispondente a quanto descritto.

Si noti il posizionamento delle telecamere rispetto al treadmill, posto esattamente al centro del volume:

- per procedere in maniera ordinata, le telecamere sono state numerate con numero progressivo in senso orario;
- le camere 1/5 e 3/7 sono state collocate in posizione leggermente 'sfalsata' rispetto alle direzioni antero-posteriore e sinistra-destra nel capture volume. Questo onde evitare una completa sovrapposizione dei relativi campi di vista ed un'interferenza tra le telecamere stesse;
- le altre camere (2/6 e 4/8) sono state invece posizionate lungo le diagonali dell'ottagono che quindi le uniscono; e
- si è cercato di posizionare le telecamere ad una distanza predefinita l'una dall'altra, distanza di circa 3.0÷3.5 m.

Si osservi infine la posizione dell'L-Frame, posizione che sarà fondamentale nella fase di calibrazione statica. Esso viene posizionato sul treadmill, al centro dello stesso, a circa a 3/5 dalla sua estremità anteriore. È importante conoscere anche la sua orientazione. Questa difatti definisce la direzione dei tre assi principali del capture volume (x, antero-posteriore; y, medio-laterale; e z, inferiore-superiore o verticale). Occorre pertanto che l'L-Frame (con tre marker indicanti la direzione dell'asse x e marker singolo indicante quella dell'asse y, con asse z verso l'alto, secondo la regola della mano destra) sia posizionato in linea con la direzione di movimento del treadmill stesso.

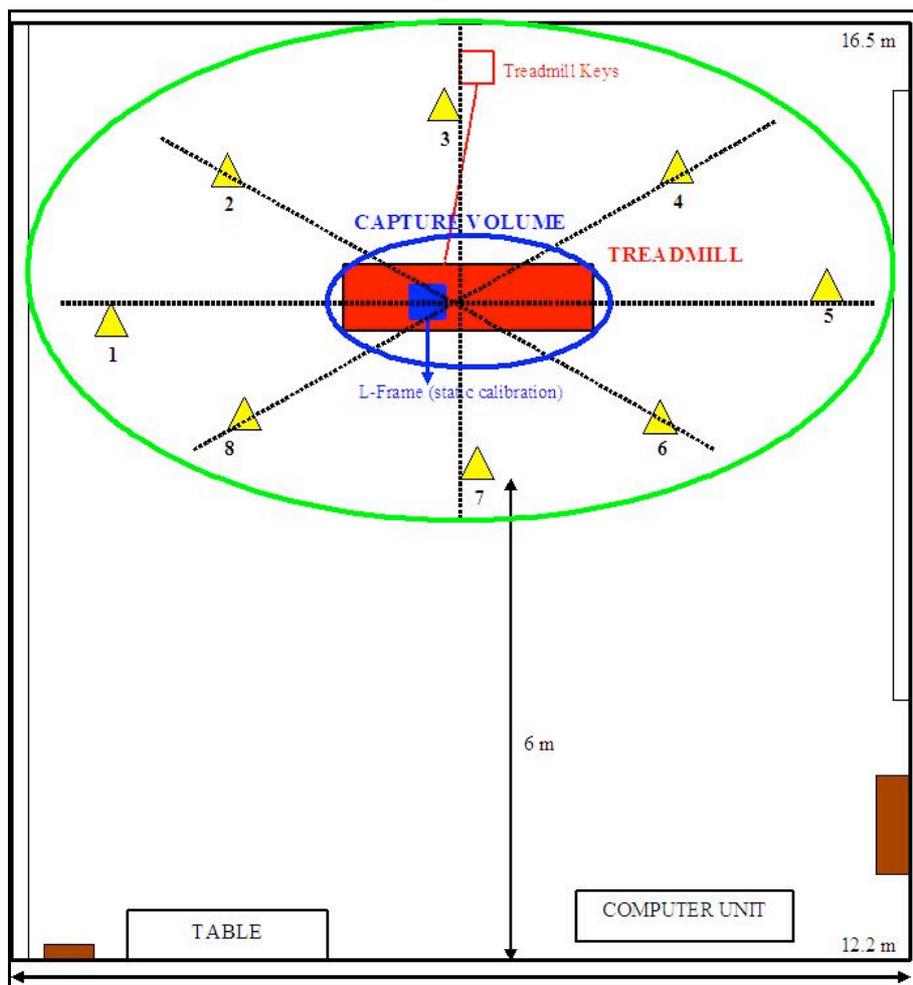


Figura 1.5: disposizione delle telecamere Vicon MX13 nel laboratorio di Biomeccanica.

1.5 CALIBRAZIONE del SISTEMA

1.5.1 Introduzione

La calibrazione viene effettuata mediante elementi di geometria nota, l'L-Frame ed il Wand. Il sistema calcola i valori delle variabili del modello di rappresentazione geometrica nello spazio e delle distorsioni introdotte dall'ottica delle telecamere anche grazie all'acquisizione di informazioni sulla loro posizione.

Esistono diversi metodi di calibrazione. Quale metodo venga adottato dipende dal modello matematico utilizzato dal sistema. Durante la successiva fase di acquisizione, il sistema stereofotogrammetrico fornirà dati relativi alla posizione in due dimensioni dei marker presenti nel campo visivo di ciascuna telecamera (figura 1.6). Successivamente, queste coordinate

bidimensionali verranno utilizzate nella fase di tracciatura dei marker (*Labeling*) per ricostruirne le coordinate tridimensionali.

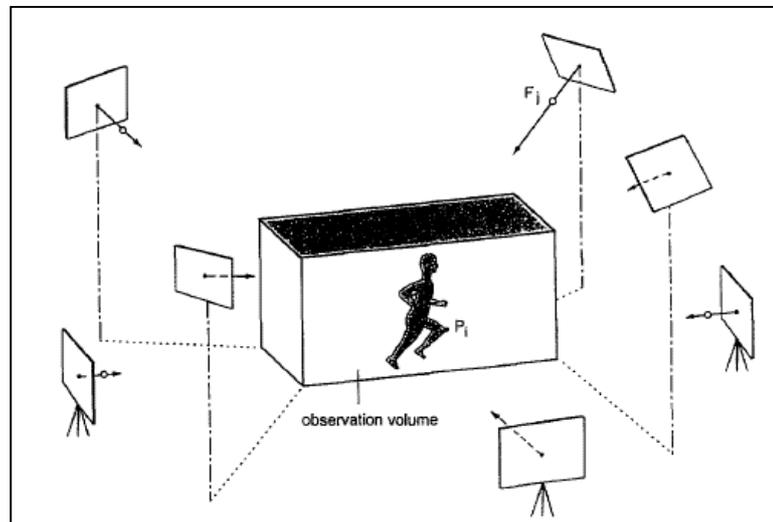


Figura 1.6: stereofotogrammetria (ogni punto riflettente presente sulla scena ha una sua rappresentazione nelle immagini bidimensionali della camera).

1.5.2 Il protocollo di calibrazione

Prima di procedere con la calibrazione (statica e dinamica), occorre selezionare la frequenza di acquisizione (in Hz) del sistema stesso. In base alla frequenza di acquisizione (variabile tra un minimo di 25 ed un massimo di 1000 Hz, a risoluzione limitata) varierà la precisione del sistema nella ricostruzione della posizione dei marker. Ovviamente, maggiore è la frequenza di acquisizione, maggiore sarà la precisione del sistema. Aumentando la dimensione del capture volume, aumenta contemporaneamente la necessità di maggiore accuratezza di registrazione del sistema.

Per studiare marcia e corsa, si utilizza per lo più la frequenza di campionamento di 100 Hz.

Prima di procedere alla duplice fase di calibrazione, è necessario posizionare all'interno del capture volume stesso alcuni marker, preferibilmente rispettando precise forme geometriche. Questo consente, difatti, di visualizzare in maniera esatta e puntuale quali di codesti marker siano visti da ciascuna telecamera. Ovviamente sarebbe auspicabile, come già più volte sottolineato, che ogni singolo marker sia visualizzato da almeno due telecamere.

Per rendere visibile cosa ciascuna telecamera inquadri data la sua collocazione nello spazio occorre selezionare la funzione *Live Monitor*. In questo modo sullo schermo del computer viene riportato precisamente ciò che ciascuna telecamera inquadra, sia in termini di marker posizionati nel volume e sia in termini di possibile presenza di riflessi e/o disturbi luminosi. In questa fase iniziale, tali riflessi e disturbi possono essere corretti e 'puliti'.

Selezionando la modalità *Diagnostic Mode*, compare una finestra di visualizzazione del volume, sulla quale intervenire con la funzione *Threshold Grid*, ossia la creazione di un'apposita griglia quadrettata dove intervenire in maniera molto precisa per la pulizia dell'immagine da riflessi e disturbi. Questa funzione può essere utilizzata anche a calibrazione già avvenuta per eliminare altri riflessi comparsi successivamente in previsione dell'acquisizione vera e propria.

Se quanto è inquadrato da una telecamera non soddisfa, se ne possono modificare i valori di *Threshold*, *Strobe*, *Gain* e *Circularity*, cioè possibili regolazioni via software riguardanti ottica e visualizzazione e ricostruzione della posizione dei marker, fino ad ottenere un'immagine più accurata degli stessi. Ovviamente, possono essere corrette anche altezza della telecamera stessa (agendo sul cavalletto), suo orientamento nello spazio (intervenendo su apposite manopole di regolazione del supporto) ed eventualmente suoi fuoco e diaframma (regolazione, quest'ultima, che non necessita di venire effettuata spesso, a meno che non si cambi completamente tipo di laboratorio).

1.5.3 Fasi dettagliate del protocollo di calibrazione

Il protocollo di calibrazione è costituito da due fasi:

- 1) *posizionamento e ripresa dell'L-Frame*, riferimento assoluto per la posizione dei marker. Esso ha forma triangolare, lato lungo 280 mm ed ipotenuosa 390 mm. Su di esso sono collocati 4 marker in totale (di dimensione 14 mm): 3 in una direzione (asse x: antero/posteriore) e 1 nella direzione perpendicolare (asse y: medio/laterale). L'L-Frame deve essere posizionato al centro del volume che si intende calibrare. L'orientamento dell'L-Frame corrisponde pertanto all'orientamento del sistema, definendone quindi l'origine. La durata di questa prima fase di calibrazione, detta anche *calibrazione statica*, viene regolata e predefinita dal software stesso (solitamente 3"). Essa sarà temporalmente limitata e precederà la calibrazione dinamica; e

2) sequenza di spazzolamento (Wand): consiste nello 'spazzolare' tutto il volume di calibrazione con l'apposita asta Wand. Operazione, questa, che viene compiuta dall'operatore stesso (che si posizionerà all'inizio e alla fine di codesta fase all'esterno del volume). Il sistema Vicon prevede l'esistenza di tre diverse aste Wand, da utilizzare in relazione a diverse dimensioni del capture volume e frequenze di acquisizione del sistema: un Wand da 120 mm con tre marker di diametro 9 mm; un Wand da 240 mm con tre marker di diametro 14 mm; ed un Wand da 390 mm con tre marker di diametro 25 mm (in quest'ultimo caso si richiede l'impiego di un'estensione per allungare il Wand stesso). Lo spazzolamento permette di confrontare le distanze note tra i marker dell'asta con quelle rilevate effettivamente in seguito alla ripresa dell'L-Frame, stimando l'errore di distorsione dell'immagine del volume e le esatte dimensioni del volume stesso. Tale procedura è un molto più lunga della precedente in quanto è prevista un'acquisizione la durata della quale dipende, con relazione di proporzionalità diretta, dalla frequenza di acquisizione del sistema. Maggiore risulta essere quest'ultima, maggiore sarà la durata della *calibrazione dinamica* (come viene chiamata questa fase), e dunque il numero di frame rilevato (solitamente, si arriva a circa 30,000 frame = 5'). Noi utilizziamo l'asta Wand da 240 mm, con registrazione di almeno 30,000 frame. Durante la calibrazione con l'asta Wand, occorre spostarsi lungo tutte le direzioni e attorno a tutti gli assi, in tutto il capture volume. Questa fase sarà svolta sempre rimanendo sul treadmill e percorrendo avanti/indietro, sinistra/destra e basso/alto la sua intera superficie. Attenzione particolare deve essere data a lunghezza, larghezza ed altezza del volume da calibrare (variabili che saranno poi fondamentali per le successive acquisizioni). Occorre essere adeguatamente impegnati durante questa fase. Dall'accuratezza e dalla 'maestria' dell'operatore che effettua questa procedura dipende l'affidabilità e la precisione della calibrazione.

In generale, una buona calibrazione è accettabile se la sua *wand visibility* è almeno compresa tra 50 e 60%. Se questo ambito non viene raggiunto la calibrazione non dovrebbe essere accettata e dovrebbe essere ripetuta, mediante la funzione *Reprocess* o *Cancel*. In quest'ultimo caso si può ripetere entrambe le calibrazioni oppure solamente quella che è risultata erranea.

La calibrazione accettata viene automaticamente salvata da Workstation 5.1 con data e orario di acquisizione. Essa ha validità fino a quando non vengano spostate la camere (pertanto può durare anche più giorni e più sessioni di prove) e sia quindi necessario ripeterla.

1.6 POSSIBILI FONTI di ERRORE

Il sistema, viste le moderne caratteristiche di analisi che lo contraddistinguono, è indubbiamente uno strumento di misura dotato di elevata precisione. Tuttavia, non deve essere trascurata l'incertezza delle misure fornite dal sistema, dovute a fonti di errore che ora verranno brevemente descritte.

Innanzitutto si può considerare l'incertezza dovuta a tutti i componenti che costituiscono il sistema e ciò è caratteristica dello strumento di misura, a differenza di altre fonti di errore, dovute al tipo di oggetto esaminato. Le cause di quest'incertezza possono essere:

- la non perfetta sfericità dei marker (del'L-Frame e dell'asta Wand);
- l'irregolarità della superficie rifrangente del marker;
- la distanza tra i marker del'L-Frame;
- la distanza tra i marker dell'asta Wand;
- la lunghezza dell'asta Wand; e
- la distorsione delle inquadrature delle telecamere calcolata dal sistema per la stima dell'errore di distorsione del volume di calibrazione.

Qualora le prove vengano effettuate con soggetti animati, altre fonti di errore che determinano l'incertezza della misura sono dovute al posizionamento dei marker. Infatti, non è sempre facile individuare i punti di repere anatomico dove applicare il marker vista la presenza di organi interni, tessuto muscolare e tessuti molli, costituenti del corpo umano. A tal proposito, è consigliabile affidarsi a personale qualificato ed esperto nel posizionamento dei marker (per es. fisioterapisti). Altro errore non trascurabile è quello dovuto al movimento della pelle rispetto al tessuto osseo sottostante, a causa di contrazioni muscolari o degli spostamenti relativi dei vari segmenti corporei. Tale errore aumenta nelle vicinanze di prominenze ossee (specialmente in corrispondenza del riferimento del Gran Trocantere), poiché in queste zone, a causa delle rotazioni dei segmenti corporei, la pelle è soggetta a maggiori deformazioni.

Un'altra fonte di errore non trascurabile è dovuta alle forze d'inerzia agenti sui marker provocate dalle accelerazioni alle quali essi vengono sottoposti. Ciò si verifica specialmente durante gesti esplosivi come possono essere un cambio di direzione, un salto od un colpo di testa.

1.7 COSTRUZIONE del MODELLO

Terminata la procedura di calibrazione (statica e dinamica), occorre, prima di procedere con lo svolgimento delle acquisizioni, costruire il modello che sarà impiegato nella procedura di 'tracking', ovvero nella fase di *Labeling* del *Vicon System*. (To) *Label* significa, in questo caso, assegnare i corretti identificativi di dati marker a traiettorie ancora indefinite.

La costruzione del modello è una tappa obbligata estremamente importante. In questa fase, difatti, vengono definiti numero preciso di marker applicati in corrispondenza di punti di repere, loro dimensioni ed eventuale bilateralità. Il modello è definito in base ai vari movimenti che si vogliono far compiere al soggetto e, dunque, in base ai movimenti articolari ed angolari, nelle diverse direzioni ed attorno ai diversi assi che si intendono studiare.

Viene costruito per mezzo della funzione *Marker Set* (praticamente, con *Blocco Note*). Nel modello occorre indicare collocazione precisa di ciascun marker e sigla che si intende abbinare al marker stesso. Questa sigla viene scelta in funzione della localizzazione del marker. Ovviamente, qualora sia presente, occorre rispettare il criterio di bilateralità anche nel nominare i marker.

1.8 SESSIONE di PROVE nella DATA DIRECTORY

Per creare una prova (soggetto), occorre aprire la *Data Directory* nell'applicazione *Workstation 5.1 (Eclipse)*. Impostata una *Cartella*, successivamente si procede alla creazione di una *Nuova Prova*. Quindi, si crea una *Nuova Sessione*, un'eventuale *Sotto-Sessione*, comprendente le varie *Trial* (acquisizioni) che verranno registrate.

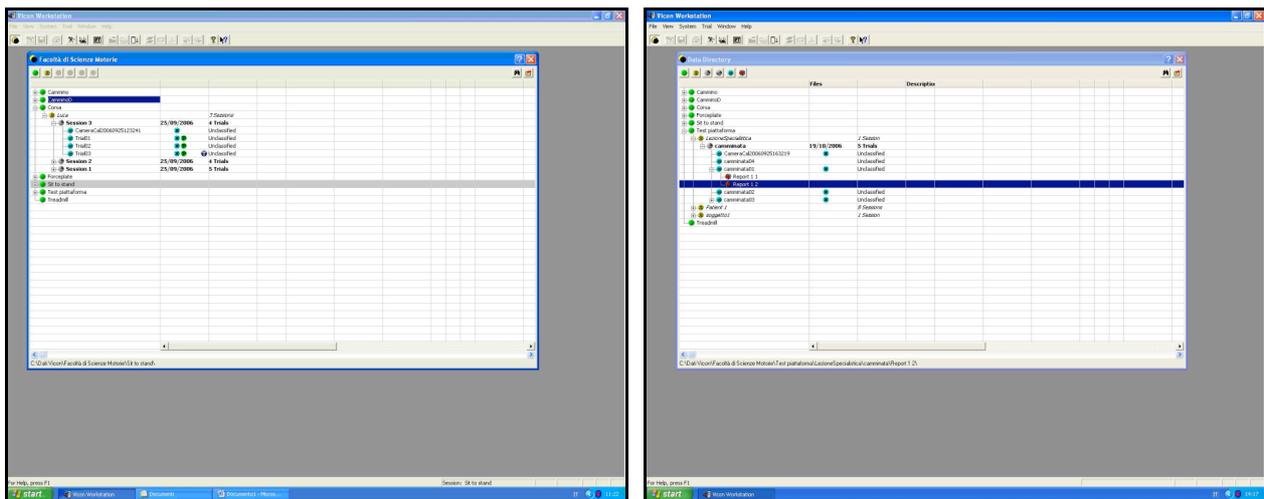


Figura 1.7: Eclipse nell'applicazione Workstation 5.1.

La figura 1.7 mostra la finestra che racchiude tutte le informazioni relative ad un pacchetto di prove. Come si osserva, ciascuna prova/soggetto, ciascuna sessione e ciascuna acquisizione vengono identificati con colori differenti: verde per la macro-cartella, giallo per il paziente, grigio per la sessione ed azzurro per l'acquisizione. Di fianco a quest'ultima possono essere presenti pallini di quattro diversi colori:

- giallo, ossia formato MPEG, cioè un format video;
- rosa, ossia formato ANALOGUE, qualora siano presenti acquisizioni analogiche (per es. utilizzando sistemi elettromiografici, piattaforme dinamometriche...);
- azzurro, ossia formato TVD, con dati video ancora non processati;
- verde, ossia formato C3D, con movimenti tridimensionali già digitalizzati; o
- colore giallo con una T, ossia dati già processati automaticamente per mezzo della funzione 'Pipeline'.

1.9 TRIAL DATA CAPTURE

Questa fase rappresenta la vera e propria registrazione della sessione di prove. Avvenute le procedure di corretto posizionamento delle camere, calibrazione del capture volume, creazione

del modello (e posizionamento dei marker sul soggetto) e creazione di un'apposita macro-cartella per i dati, si procede ora allo svolgimento della sessione vera e propria.

La prima prova che viene fatta svolgere è di tipo statico. Occorre, aprendo la cartella *Trial Data Capture*, selezionare *Trial Type* (durata e dimensioni dei marker) e *Pipeline*, selezionando le funzioni che si desiderano nella fase di processamento automatico dei dati. Noi individuiamo le seguenti funzioni; *Reconstruct*, *Label*, *Fill gaps*, *Export data to ASCII*, *Export data to ASCII advanced* e *Save trial*. Questa Pipeline e relativo comando di *Process now* possono essere lanciati anche a registrazione prova già avvenuta. Ciò consente di processare i dati anche in un secondo momento, individuando man mano le funzioni che si desiderano. S'individuano infine le modalità di registrazione della prova (per es. *Video data* e *3D Workspace*). Ovviamente, queste informazioni devono essere precedentemente impostate anche in caso di registrazione della prova statica (informazioni diverse rispetto a quelle necessarie nel caso delle successive acquisizioni dinamiche).

Definiti tutti i suddetti parametri, si può procedere, per mezzo della funzione *Capture*, alla registrazione della prova statica. Il soggetto deve posizionarsi, in posizione più naturale possibile, esattamente al centro del capture volume.

Al termine di questa registrazione, dopo avere salvato la prova, si può iniziare il *Labeling*, ovvero la ricostruzione del modello. Per fare ciò, occorre selezionare la modalità *Attach marker set for...* Così facendo, si seleziona il modello definito in precedenza. È dunque possibile abbinare ai marker l'identificativo corrispondente, scegliendo lo stesso dal modello predefinito e preselezionato. Qualora si compiesse un errore in questa fase di tracking è possibile deselegionare l'eventuale marker (*Unlabel* e nuovamente *Select*) e rinominarlo con altro nome.

Una volta che tutto il modello sia stato esattamente ricostruito, si salverà la prova (il trial può essere nominato anche a prova completata). A questo punto, comparirà nella *Data Directory*, il pallino verde, ovvero la segnalazione della compilazione del relativo file *c3d*. E, se si sono già selezionate e lanciate le funzioni della Pipeline, anche la T di colore giallo.

Nella fase di *Labeling*, è possibile spostare l'immagine a monitor in tutte le direzioni, zoomare (tramite il tasto destro del mouse) e visionare i vari frame agendo sulla banda d'indicazione del tempo. Prima di procedere all'effettuazione delle restanti prove (siano esse di tipo statico o di tipo dinamico), selezionando la funzione *Create Autolabel Calibration*, ed associando alla stessa i valori ricavati in seguito alla prova statica iniziale, è possibile impostare *Workstation 5.1* in modo tale che esso, automaticamente, associ, in un'eventuale prova successiva, ai dati marker

il corretto Labeling sulla base del modello adottato. Il comando che si abilita a questo livello, l'*Autolabel*, risulta di estrema importanza, perché semplifica le procedure di *Label* e *Reconstruct* relative alle prove successive.

È possibile, quindi, compiuto questo ulteriore passaggio, procedere con lo svolgimento delle altre prove del protocollo, una volta definite, per ciascuna di esse, le caratteristiche specifiche (per es. marcia a 4 km/h in piano o corsa a 8 km/h contro un 5% di pendenza).

Risulta importante ricordare, infine, come ciascuna *Trial* possa essere salvata sul disco locale, con i relativi file, in diversi possibili formati: Excel, ASCII, txt od altri formati. Questo permette di proseguire, dunque, l'analisi della cinematica del movimento utilizzando diversi software.

2 MOTO PARABOLICO di una PALLINA

2.1 OBIETTIVI

Una pallina può essere lanciata verticalmente od antero-verticalmente con una traiettoria parabolica. In questo caso gli obiettivi sono:

- studiare lo spostamento di una pallina/marker lungo le tre direzioni di movimento (x: antero/posteriore; y: medio/laterale; e z: verticale);
- per ciascuna direzione di movimento, calcolare le rispettive velocità (v_x , v_y e v_z);
- infine, calcolare energia potenziale (EP), energia cinetica (EK) ed l'energia totale (ET) della pallina.

L'andamento di ciascuna di queste variabili durante tutta la durata del movimento saranno rappresentati ed apprezzati graficamente (nonché discussi), al fine di isolarne e studiarne le fasi principali. Si sarà dunque in grado di caratterizzare, nelle sue principali grandezze, il moto parabolico di una pallina.

2.2 STRUMENTI

- Sistema mocap Vicon MX ad 8 telecamere (frequenza di campionamento del sistema 100 Hz). Per le principali proprietà ed il funzionamento, nelle linee generali, si veda il capitolo precedente;
- 3 marker tecnici (diametro di 14 mm); ed
- 1 pallina/marker (diametro di 25 mm).

2.3 SVOLGIMENTO della PROVA

Poiché l'obiettivo principale è lo studio del moto parabolico della pallina nelle sue diverse componenti/fasi, la preparazione (e definizione del *capture volume*) e la calibrazione del sistema opto-elettronico Vicon MX vengono eseguite prima dell'inizio.

2.3.1 Marker set

La prima grandezza da definire è appunto il marker set adottato per la descrizione cinematica del moto. Come presentato dettagliatamente al termine di questo paragrafo, esso è estremamente semplice:

- a) 3 palline/marker da 14 mm (chiamati marker tecnici, i movimenti dei quali sono trascurati: TECAV; TECSX; TECDI). La presenza dei marker tecnici è richiesta dal sistema per la corretta ricostruzione della cinematica del sistema (nonché per la distinzione tra parte sinistra e parte destra); e
- b) 1 pallina/marker da 25 mm (chiamata BALLG).

Nello specifico, ecco il listato:

!MKR#2

[Autolabel]

TECAV Tecnico Avanti

TECSX Tecnico Sinistra

TECDI Tecnico Dietro

BALLG Pallina grande

Corpo = TECAV,TECSX,TECDI

2.3.2 Nel dettaglio della prova...

Dopo avere 'caricato' il marker set selezionato e preparato il sistema Vicon MX per l'acquisizione della prova cinematica:

- a) un operatore si pone al centro del *capture volume* con la pallina tenuta sul palmo di una delle due mani;
- b) la mano deve essere bene aperta, con la pallina posizionata al centro del palmo;

- c) al via, l'operatore, con il solo aiuto della mano (rimanendo il più possibile fermo con il resto del corpo), lancerà la pallina in modo che essa compia, contemporaneamente, un movimento traslatorio in direzione avanti ed uno in direzione verticale (moto parabolico);
- d) risulta dunque chiaro che la posizione iniziale della pallina non è coincidente con l'origine – O (lungo le direzioni orizzontali e verticale) del sistema, vista la posizione spaziale non controllata dell'operatore durante la fase di lancio;
- e) la prova è completata dopo che la pallina ha toccato terra (raggiungendo quindi una posizione presumibilmente 'più bassa' rispetto a quella iniziale);
- f) pertanto, la durata delle prova può essere solamente 'stimata' a priori.

2.3.3 Cinematica della pallina

Si registra la cinematica della pallina durante queste fasi successive:

- circa 5 secondi prima che la pallina si stacchi dalla mano dell'operatore;
- il completo moto parabolico della pallina (istante nel quale la pallina si stacca dalla mano, fase ascendente della parabola fino all'istante di massima altezza di volo della pallina, fase discendente della parabola ed istante nel quale la pallina tocca il suolo); e
- circa 5 secondi dopo che la pallina ha nuovamente toccato terra.

In questo modo, è registrata la cinematica completa del moto della pallina.

2.4 ANALISI dei DATI

L'operatore svolge al computer l'analisi dei dati cinematici ('labelizzazione' della prova ed esportazione dei dati in formato Excel).

2.4.1 Spostamento tri-dimensionale della pallina

La posizione nel tempo, cioè lo spostamento lungo le tre direzioni di movimento (frame per frame) della pallina, viene fornito automaticamente dal sistema Vicon MX (in un file adatto ad Excel).

Si devono 'plottare' tali spostamenti in un apposito grafico, come riportato in figura 2.1 . Ciascuno spostamento (x, y e z, espresso in mm) è rappresentato in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Figura 2.1: spostamento tri-dimensionale della pallina.

Si deve quindi leggere/interpretare tale grafico:

- a) lungo la **direzione antero/posteriore** (x, colore blu), l'iniziale negatività è dovuta alla posizione spaziale del soggetto prima di effettuare il lancio; posizione, a sua volta, influenzata dalla calibrazione statica del sistema. In questo caso, il soggetto si trova, come già brevemente accennato, in posizione posteriore e sopraelevata rispetto allo O fissato come origine del sistema. Si osservino, a questo riguardo, i valori iniziali della posizione della pallina sia lungo la direzione antero/posteriore e sia lungo la direzione verticale. Si osserva un iniziale contro-movimento (involontario del soggetto, ulteriore negatività dello spostamento, circa tra i 100 ed i 150 centesimi di secondo). A circa 150 centesimi di secondo viene fatto corrispondere l'istante nel quale la pallina si stacca dalla mano del soggetto. In seguito si osserva un cospicuo avanzamento della pallina (con progressiva riduzione della negatività della posizione iniziale). Il lancio è stato eseguito correttamente;
- b) lungo la **direzione medio/laterale** (y, colore viola), si osserva, come prevedibile, uno spostamento minimo della pallina. Questo minimo spostamento medio/laterale della pallina è indice di buon lancio; e
- c) lungo la **direzione verticale** (z, colore giallo), si osserva un iniziale contro-movimento (involontario) del soggetto. Segue dunque lo spostamento verticale della pallina sino al

raggiungimento della massima altezza di volo (parabola ascendente). Raggiunta la massima quota di volo (circa ai 200 centesimi di secondo), la pallina scende sino a terra (parabola discendente).

2.4.2 Velocità tri-dimensionale della pallina

Noti lo spostamento (tri-dimensionale) ed il tempo durante il quale esso (o ciascuna delle sue tre componenti) avviene, è dunque possibile calcolare anche la relativa velocità, usando la formula [2.1]:

$$v = \frac{\text{spostamento}}{\text{tempo}} \quad [2.1]$$

Pertanto, applicando questa semplice formula della fisica, si è in grado di calcolare le velocità della pallina lungo ciascuna direzione di movimento. Nell'applicazione della suddetta formula, deve essere prestata estrema attenzione alla definizione della corretta unità di misura.

Si deve 'plottare' tale velocità in un apposito grafico, come riportato in figura 2.2 . Separatamente, ciascuna componente-velocità (v_x , v_y e v_z , espresse in m/sec) è rappresentata in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Figura 2.2: velocità tri-dimensionale della pallina.

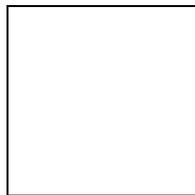
Si deve quindi leggere/interpretare tale grafico:

- a) lungo la **direzione antero/posteriore** (x, colore blu), si osserva l'iniziale involontario contro-movimento: la velocità orizzontale di movimento si presenta inizialmente negativa. Tale velocità aumenta poi sino all'istante nel quale la pallina si stacca dalla mano dell'operatore (circa ai 150 centesimi di secondo). Raggiunto questo istante, la velocità orizzontale si stabilizza;

- b) lungo la **direzione medio/laterale** (y , colore viola), come prevedibile, non si apprezzano significative variazioni della velocità durante tutta la durata del movimento;
e
- c) lungo la **direzione verticale** (z , colore giallo), si osserva l'iniziale involontario contro-movimento: la velocità verticale di movimento si presenta inizialmente negativa. Tale velocità aumenta poi sino all'istante nel quale la pallina si stacca dalla mano dell'operatore, raggiunto il quale essa diminuisce costantemente (sino al valore di 0 , pari al momento nel quale la pallina si trova alla massima altezza di volo: fase ascendente della parabola) e diviene dunque negativa (sempre per l'azione dell'accelerazione di gravità: fase discendente della parabola).

Dunque, la parabola ascendente corrisponde inizialmente ad un aumento di velocità verticale 'positiva'; la parabola discendente ad un'ulteriore diminuzione di velocità verticale 'positiva'.

Infine, la linea verde rappresenta l'andamento della velocità totale calcolata come [2.2]:

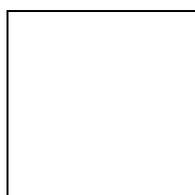


[2.2]

dove v_x rappresenta la velocità lungo la direzione antero/posteriore; v_y la velocità lungo la direzione medio/laterale e v_z la velocità lungo la direzione verticale.

2.4.3 Energia cinetica, potenziale e totale della pallina

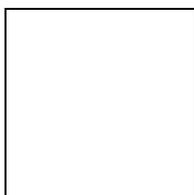
La velocità totale calcolata [2.2] serve dunque per calcolare la corrispondente energia cinetica (E_K) [2.3]:



[2.3]

dove m rappresenta la massa della pallina e v la sua velocità totale.

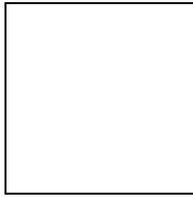
L'energia potenziale (EP) è calcolata come [2.4]:



[2.4]

dove m rappresenta la massa della pallina, g l'accelerazione gravitazionale terrestre (9.81 m/sec^2) ed h lo spostamento lungo la direzione verticale (z).

L'energia totale (ET) è calcolata come somma di EK e EP [2.5]:



[2.5]

Si devono 'plottare' tali energie in un apposito grafico, come riportato in figura 2.3 . Ciascuna energia (EK, EP e ET, espresse in J) è rappresentata in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Come si può vedere dal grafico, l'andamento dell'energia cinetica, come prevedibile, è speculare a quello dell'energia potenziale e viceversa.

Figura 2.3: energie (cinetica, potenziale e totale) della pallina.

Nello specifico:

- a) l'**energia cinetica** (colore azzurro) aumenta nella fase iniziale sino al momento nel quale la pallina si stacca dalla mano dell'operatore. Durante la fase ascendente di volo della pallina, essa però diminuisce sino al valore minimo all'istante nel quale si raggiunge la massima altezza di volo (in verticale, c'è solo energia potenziale), per poi aumentare nuovamente nella fase discendente della parabola (recupero di velocità e dunque di energia cinetica);
- b) viceversa, l'**energia potenziale** (colore rosso) diminuisce nella fase iniziale per la presenza del contro-movimento. Nel momento in cui la pallina si stacca dalla mano, essa comincia ad aumentare sino al raggiungimento della massima altezza di volo (fase ascendente). Raggiunta la quale, essa diminuisce sino ad un valore nullo finale (fase discendente); e
- c) l'**energia totale** (colore verde) diminuisce leggermente nella fase iniziale del movimento (a causa del contro-movimento), per poi aumentare nel momento in cui la

pallina si stacca dalla mano. Da questo momento sino a quello nel quale la pallina tocca terra, essa assume un valore costante pari alla somma dei due contributi energetici. Dopo che la pallina ha toccato terra, come prevedibile, essa assume un valore nullo.

2.5 CONCLUSIONI

Il moto parabolico della pallina è stato indagato in tutte le sue principali componenti.

Si possiedono quindi le conoscenze fisico/cinematiche per la sua analisi ed un'eventuale trasposizione anche con altri tipi di oggetti.

3 LANCIO VERTICALE: MOTO di un BASTONCINO

3.1 OBIETTIVI

1. Studiare lo spostamento lungo le tre direzioni di movimento (x: antero/posteriore; y: medio/laterale; e z: verticale) di un bastoncino con due marker/palline posizionati/e, rispettivamente, in prossimità di ciascuna delle sue estremità;
2. per ciascuna direzione di movimento, calcolare lo spostamento del centro di massa del bastoncino (COM_x ; COM_y e COM_z), risultante dalla combinazione del moto (precedentemente calcolato al punto 1) dei due singoli marker;
3. quindi, calcolare lo spostamento complessivo del centro di massa del sistema, risultante dalla combinazione del moto (precedentemente calcolato al punto 2) lungo le tre direzioni;
4. a partire da questo spostamento, calcolare la corrispondente velocità del centro di massa del bastoncino;
5. infine, calcolare l'energia cinetica (EK), l'energia potenziale (EP) e l'energia totale (ET) del centro di massa del bastoncino.

L'andamento di ciascuna di queste variabili/grandezze sarà rappresentato ed apprezzato graficamente (nonché discusso) durante tutta la durata del movimento, al fine di isolarne e studiarne le fasi principali.

Al termine, l'operatore sarà dunque in grado di caratterizzare, nelle sue principali grandezze, il moto di un bastoncino, soffermandosi principalmente sul moto del suo centro di massa.

Prima di proseguire entrando nel merito dello svolgimento della prova e dell'analisi dei dati cinematici, è necessario soffermarsi sulla definizione/caratterizzazione della grandezza **centro di massa**.

3.2. CENTRO di MASSA

3.2.1 Introduzione

In generale, occorre operare una distinzione terminologica tra 'centro di massa' (Center of Mass, COM), 'centro di gravità' (Center of Gravity, COG) e 'centro di pressione' (Center of Pressure, COP). Nello specifico, come da figura 3.1:

- il **COM** (centro di massa o baricentro) rappresenta il punto del corpo nel quale si considera concentrata la massa del corpo stesso, in un sistema puntiforme;
- il **COG** (proiezione a terra del COM) rappresenta il punto al suolo lungo la retta di azione della forza di gravità passante per il COM; ed
- il **COP** rappresenta il punto al suolo sul quale si considera applicata la risultante globale delle pressioni di reazione del suolo sulla pianta del piede.

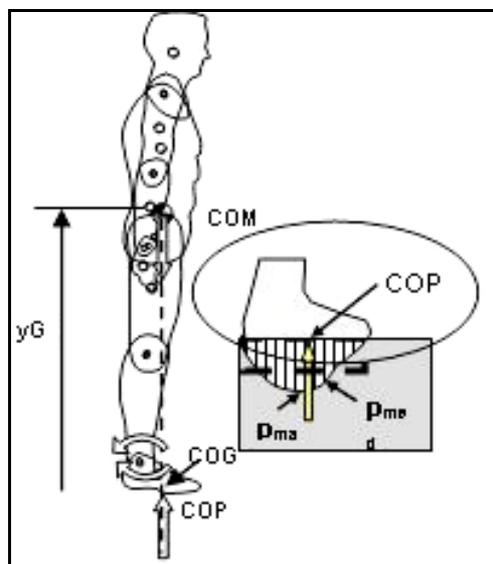


Figura 3.1: COM, COG e COP come tre concetti separati e diversi.

I paragrafi successivi si focalizzeranno appunto sulla grandezza 'centro di massa'.

3.2.2 Centro di massa come 'centro delle masse'

Il concetto di centro di massa ha il grande vantaggio di semplificare, dal punto di vista formale ed intuitivo, la fisica dei sistemi di particelle. Come dice il nome, il significato di questa grandezza è quella di *centro delle masse*. Difatti, un principio fondamentale della dinamica dei sistemi di punti materiali (*prima equazione cardinale*) dice che il centro di massa di un sistema ha lo stesso moto di un singolo punto materiale nel quale sia concentrata tutta la massa del sistema, e sul quale agisca la risultante delle sole forze esterne agenti sul sistema. Questa proprietà vale sotto l'unica ipotesi che per le forze interne (quelle cioè che rappresentano l'interazione fra i punti costituenti il sistema) valga il principio di azione e reazione.

Come caso particolare, quando sul sistema non agiscono forze esterne (cioè quando il sistema è isolato), ne consegue la conservazione della quantità di moto totale.

3.2.3 Definizione e principali caratteristiche

Il centro di massa deriva il suo nome (etimologicamente significa *centro del peso*) dal fatto che quando un corpo è immerso in un campo di gravità **uniforme** (come avviene, con buona approssimazione, sulla superficie terrestre, dove l'accelerazione di gravità si può ritenere costante), allora il moto del baricentro è equivalente al moto di caduta, sotto l'azione della forza peso, di un punto materiale nel quale sia concentrata la massa totale del corpo.

Se, in particolare, si considera un corpo rigido vincolato in un punto diverso dal baricentro (nel baricentro, il momento totale della forza peso risulta nullo), esso si comporta come un pendolo (la lunghezza equivalente del quale, tuttavia, non coincide con la distanza fra baricentro e centro di sospensione, ma dipende dal momento d'inerzia del corpo).

È da notare che nel caso (difficilmente presente in pratica) in cui un corpo sia immerso in un campo gravitazionale esterno **non uniforme**, allora queste ultime proprietà non valgono, poiché la risultante delle forze (che determina l'accelerazione del centro di massa) può differire dalla forza peso che si eserciterebbe sul baricentro se in esso fosse concentrata tutta la massa del corpo; inoltre, il momento totale della forza di gravità rispetto al centro di massa può non essere nullo.

Nel linguaggio scientifico i termini *centro di massa* e *baricentro* sono usati come sinonimi a tutti gli effetti, ed entrambi si riferiscono alle proprietà inerziali del sistema, indipendentemente dalla natura delle forze applicate.

3.2.4 Centro di massa di un insieme di punti

Il centro di massa, rappresentante il punto del corpo nel quale si considera concentrata la massa del corpo stesso, è una funzione solamente di:

1. le posizioni tri-dimensionali delle particelle che costituiscono il corpo/sistema; e
2. le masse delle suddette particelle.

Ricordiamo ancora che si definisce:

- a) 'massa' m : la proprietà fondamentale di un corpo di resistere ad una modifica della velocità; essa si manifesta anche nell'attrazione gravitazionale tra corpi; e
- b) 'densità' ρ : l'ammontare di massa m per unità di volume V ($\rho = m/V$).

Calcolare il centro di massa di un corpo/sistema diviene dunque facile qualora siano note le caratteristiche del corpo/sistema. Difatti:

1. se si tratta di un **sistema discreto** N di punti materiali, il centro di massa è il punto geometrico le coordinate del quale, in un definito sistema di riferimento, sono date da [3.1]:

$$\mathbf{R}_{\text{COM}} = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + \dots + m_n \mathbf{r}_n}{M} \quad [3.1]$$

dove m_1, m_2, m_n sono le masse delle particelle del corpo/sistema, \mathbf{r}_i sono i raggi vettori dei punti materiali rispetto ad un sistema di riferimento qualsiasi e $M = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ è la massa totale del sistema.

Nota la relazione tra massa m e densità ρ [3.2], l'equazione precedente diviene [3.3]:

$$M = \int \rho \, dV \quad [3.2]$$

$$\mathbf{R}_{COM} = \boxed{\phantom{\int \mathbf{r} \rho dV}} \quad [3.3]$$

dove \mathbf{R}_{COM} è il raggio vettore risultante del centro di massa, \mathbf{r} è il raggio vettore del sistema, M è la massa totale, ρ la densità e V il volume.

Questa è però un'equazione vettoriale, per la quale dal punto di vista del calcolo converrà sempre utilizzare le sue proiezioni sugli assi (soprattutto quando si opera con sistemi discreti con molti segmenti; [3.4, 3.5 e 3.6]):

$$x_{COM} = \boxed{} \quad [3.4a] \quad \text{o} \quad x_{COM} = \boxed{} \quad [3.4]$$

$$y_{COM} = \boxed{} \quad [3.5a] \quad \text{o} \quad y_{COM} = \boxed{} \quad [3.5]$$

$$z_{COM} = \boxed{} \quad [3.6a] \quad \text{o} \quad z_{COM} = \boxed{} \quad [3.6]$$

dove x, y e z sono appunto le tre direzioni/assi.

Un primo facile possibile esempio di calcolo del centro di massa di un sistema costituito da due masse è rappresentato in figura 3.2: in questo caso, il movimento avviene solamente lungo una direzione (x).

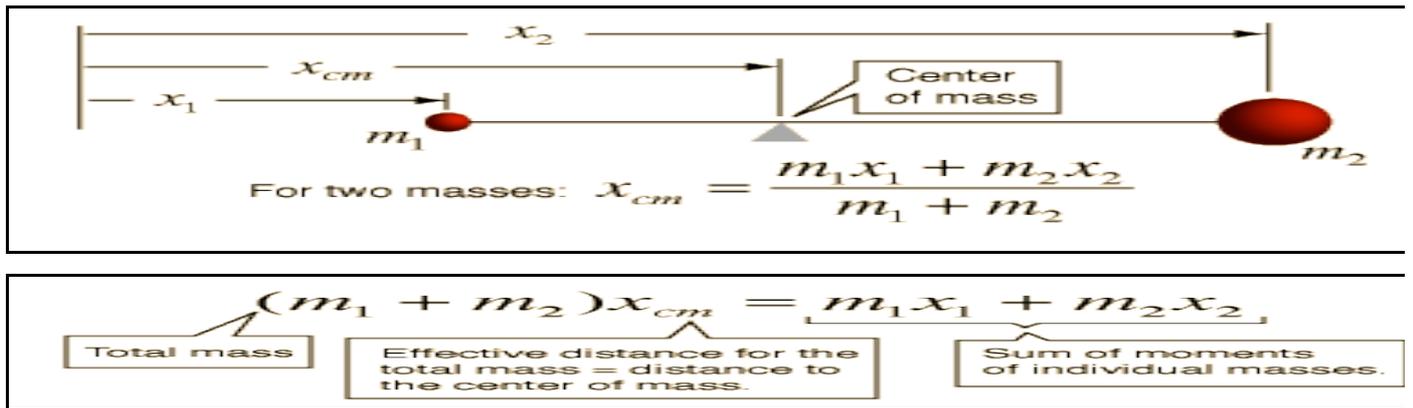


Figura 3.2: COM per un sistema monodimensionale di due masse.

Ancora, occorre ricordare che:

- nel caso di un corpo rigido, la posizione del centro di massa è facilmente identificabile per simmetria o per costruzione geometrica; solitamente è fissata in relazione all'oggetto stesso e non necessariamente a contatto con esso; e
- nel caso di una distribuzione discreta libera di masse nello spazio libero, la posizione del centro di massa è un punto nello spazio tra quelli che possono anche non corrispondere alla posizione di ciascuna massa singola; e

2. se si tratta di un **sistema continuo**, le sommatorie del quale sopra sono sostituite da somme integrali estese al dominio occupato dal sistema. Ancora, se il sistema continuo è *omogeneo* (qualora le masse contenute in ciascuno di due volumi uguali di un dato corpo sono uguali), allora $\rho(r) = \text{costante}$, ed il suo centro di massa è lo stesso del centroide della sua forma.

3.2.5 Centro di massa corporeo

Le nozioni di base che seguono serviranno per l'analisi della prova statica e, soprattutto, dinamica (deambulazione: marcia e corsa) di un soggetto.

Qualora le masse contenute in ciascuno di due volumi uguali di un dato corpo non sono uguali, esso viene detto *eterogeneo*. Poiché ossa, muscoli, organi interni e tessuti grassi hanno densità diverse, il corpo umano è per definizione non omogeneo.

Nel caso del corpo umano, il centro di massa è il punto nel quale si considera concentrata tutta la massa corporea qualora si consideri il sistema puntiforme. Si parla più propriamente di **centro di massa corporeo (BCOM)**.

È pertanto un punto materiale rispetto al quale tutta la massa del corpo risulta essere equamente distribuita. In posizione eretta in piedi, esso si posiziona anteriormente a L2/L3 secondo alcuni autori e anteriormente a S2 secondo altri (a circa il 59% dell'altezza totale del soggetto). In media, l'altezza relativa del COM nelle donne è da 0.5% a 2.0% minore rispetto agli uomini.

A livello del BCOM, possiamo considerare applicate le risultanti di tutte le forze agenti sul corpo umano, tra le quali la forza peso stessa. Le modificazioni più importanti della posizione di BCOM sono dovute ai movimenti di flessione/estensione degli arti e del tronco.

Ricordiamo che il centro di massa di un corpo non sempre coincide con il suo centro geometrico intuitivo, infatti, in alcuni casi, può superare ed oltrepassare questa libertà (figura 3.3).

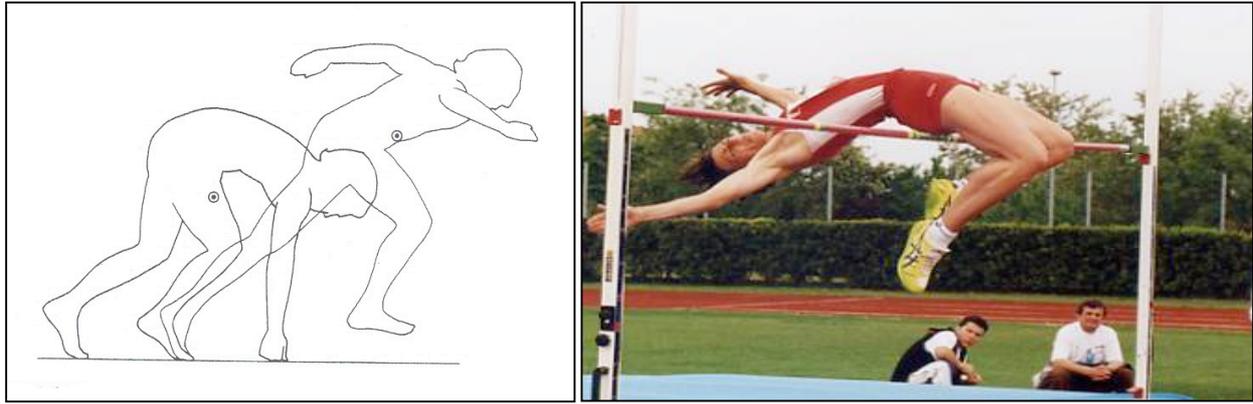


Figura 3.3: se la forma di un corpo od oggetto cambia, la posizione del centro di massa cambia.

3.3 STRUMENTI

- Sistema mocap Vicon MX ad 8 telecamere (frequenza di campionamento del sistema 100 Hz). Per le principali proprietà ed il funzionamento, nelle linee generali, si veda sopra;
- 1 bastoncino (lunghezza ...; massa ...); e
- 2 marker/palline: uno/a piccolo/a (diametro di 9 mm) ed uno/a medio/a (diametro di 14 mm), rispettivamente.

3.4 MODALITÀ di SVOLGIMENTO della PROVA

Poiché l'obiettivo principale è lo studio del moto del bastoncino (o meglio la combinazione del moto dei suoi due marker, concentrandosi sulla variabile 'centro di massa' del bastoncino) nelle sue diverse componenti/fasi, la preparazione (e definizione del *capture volume*) e la calibrazione del sistema opto-elettronico Vicon MX vengono eseguite dall'operatore prima dell'inizio.

3.4.1 Marker set

La prima grandezza da definire è appunto il marker set adottato per la descrizione cinematica del moto. Come presentato dettagliatamente al termine di questo paragrafo, esso è estremamente semplice:

- a) 3 marker da 14 mm (chiamati marker tecnici, i movimenti dei quali sono trascurati: TECAV; TECSX; TECDI), formanti un primo corpo. La presenza dei marker tecnici è richiesta dal sistema di visione per la corretta ricostruzione della cinematica del sistema (nonché per il riconoscimento delle simmetrie); ed
- b) 1 marker da 9 mm (chiamato BALLP) ed 1 marker da 14 mm (chiamato BALLM), formanti un secondo corpo.

Nello specifico, ecco il listato:

!MKR#2

[Autolabel]

TECAV Tecnico Avanti

TECSX Tecnico Sinistra

TECDI Tecnico Dietro

BALLM Pallina media

BALLP Pallina piccola

BALLM, BALLP

Corpo = TECAV,TECSX,TECDI

3.4.2 Nel dettaglio della prova...

Dopo avere 'caricato' il marker set selezionato e preparato il sistema Vicon MX per l'acquisizione della prova cinematica:

- a) un operatore si pone al centro del *capture volume* con il bastoncino tenuto su una delle due mani;
- b) la mano deve essere bene aperta, con il bastoncino posizionato al centro del palmo, dunque con i marker sui due lati della mano;
- c) al via, l'operatore, con il solo aiuto della mano (rimanendo il più possibile fermo con il resto del corpo), lancerà il bastoncino verso l'alto in modo che esso compia un movimento

- in direzione verticale. Egli cercherà, contestualmente, di limitare quanto più possibile i movimenti lungo le direzioni antero/posteriore e medio/laterale;
- d) risulta dunque chiaro che la posizione iniziale del bastoncino non è coincidente con l'origine - O (lungo le direzioni orizzontale e verticale) del sistema, vista la posizione spaziale non controllata dell'operatore durante la fase di lancio;
- e) la prova è completata dopo che il bastoncino ha toccato terra (raggiungendo quindi una posizione presumibilmente 'più bassa' rispetto a quella iniziale);
- f) pertanto, la durata delle prova può essere solamente 'stimata' a priori.

3.4.3 Cinematica del bastoncino

Si registra la cinematica del bastoncino in queste fasi successive:

- circa 5 secondi prima che esso si stacchi dalla mano dell'operatore;
- il suo moto completo durante il lancio verticale (istante nel quale il bastoncino si stacca dalla mano; fase verticale ascendente fino all'istante di massima altezza di volo; fase verticale discendente ed istante nel quale il bastoncino tocca il suolo); e
- circa 5 secondi dopo che esso ha nuovamente toccato terra.

In questo modo, è registrata la cinematica completa del moto del bastoncino.

3.5 ANALISI dei DATI

L'operatore svolge al computer l'analisi dei dati cinematici ('labelizzazione' della prova ed esportazione dei dati in formato Excel).

3.5.1 BALLP e BALLM: spostamenti tri-dimensionali

Le posizioni nel tempo, cioè gli spostamenti lungo le tre direzioni di movimento (frame per frame) del marker piccolo (BALLP) e del marker medio (BALLM) vengono forniti automaticamente dal sistema Vicon MX (in un file formato Excel).

Si devono 'plottare' tali spostamenti in appositi grafici, come riportato in figura 3.4 (a per il marker piccolo e b per il marker medio). Ciascuno spostamento (x, y e z, espresso in mm) è rappresentato in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Figura 3.4a: spostamento tri-dimensionale del marker piccolo (BALLP).

Figura 3.4b: spostamento tri-dimensionale del marker medio (BALLM).

Si devono quindi interpretare tali grafici.

Come ci si aspettava, gli spostamenti dei due marker risultano essere simili lungo tutte e tre le direzioni di movimento. Pertanto, risulta essere possibile interpretare allo stesso modo entrambi i grafici. Nello specifico:

- a) lungo la **direzione antero/posteriore** (x, colore blu), l'iniziale negatività è dovuta alla posizione spaziale del soggetto prima di effettuare il lancio; posizione, a sua volta, influenzata dalla calibrazione statica del sistema. In questo caso, il soggetto si trova, come già brevemente accennato, in posizione posteriore e sopraelevata rispetto allo O fissato come origine del sistema. Si osservino, a questo riguardo, i valori iniziali della posizione della pallina sia lungo la direzione antero/posteriore e sia lungo la direzione verticale. Tra i 100 ed i 150 centesimi di secondo viene fatto corrispondere l'istante nel quale il bastoncino (e dunque entrambi i marker) si stacca dalla mano del soggetto. In seguito si osserva un avanzamento del bastoncino stesso (con progressiva riduzione della negatività della posizione iniziale). Questo non eccessivo spostamento antero/posteriore è indice di buon lancio;
- b) lungo la **direzione medio/laterale** (y, colore viola), si osserva, come prevedibile, uno spostamento minimo (addirittura impercettibile) del bastoncino. Questo minimo spostamento medio/laterale è indice di buon lancio; e

c) lungo la **direzione verticale** (z, colore giallo), alla fase nella quale il bastoncino è fermo sulla mano del soggetto (primi 100 centesimi di secondo), segue dunque il suo spostamento verticale sino al raggiungimento della massima altezza di volo (parabola ascendente). Raggiunta la massima quota di volo (circa ai 170 centesimi di secondo), il bastoncino scende sino a terra (parabola discendente). La piccola 'gobba' che segue il movimento di salita/discesa del bastoncino, rappresenta il rimbalzo a terra dello stesso.

3.5.2 Spostamento tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino

Note le masse del marker piccolo ($m_{\text{BALLP}} = 1 \text{ g}$) e del marker medio ($m_{\text{BALLM}} = 3 \text{ g}$), è stato possibile calcolare lo spostamento tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino (figura 3.5), come:

$$x_{\text{COM}} = \frac{\sum m_i x_i}{M} \quad [3.7]$$

$$y_{\text{COM}} = \frac{\sum m_i y_i}{M} \quad [3.8]$$

$$z_{\text{COM}} = \frac{\sum m_i z_i}{M} \quad [3.9]$$

dove m_i sono le masse di BALLP e BALLM, rispettivamente, M è la massa totale intesa come somma di m_{BALLP} e m_{BALLM} (pari dunque a 4 g) e x , y e z sono appunto gli spostamenti lungo le tre direzioni/assi di ciascuna delle due masse. Nell'applicazione delle suddette formule, deve essere prestata estrema attenzione alla definizione della corretta unità di misura.

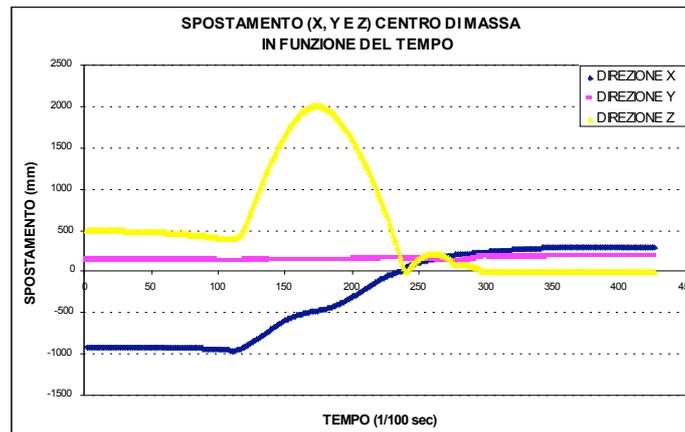


Figura 3.5: spostamento tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino.

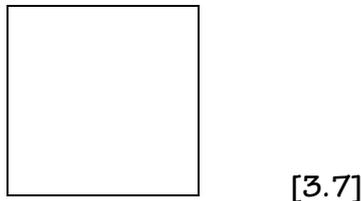
Come si può vedere da figura 3.5 e come atteso, lo spostamento tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino somiglia agli spostamenti dei suoi singoli marker costituenti.

Nel dettaglio:

- a) lungo la **direzione antero/posteriore** (x, colore blu), lo spostamento è sostanzialmente poco evidente;
- b) lungo la **direzione medio/laterale** (y, colore viola), esso è minimo e trascurabile; e
- c) lungo la **direzione verticale** (z, colore giallo), esso è evidente e ben tracciato.

3.5.3 Centro di massa del bastoncino

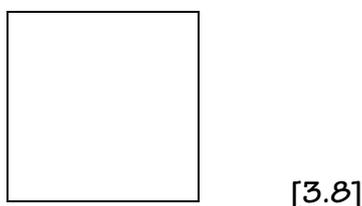
Lo spostamento totale del centro di massa (COM) del bastoncino è stato dunque calcolato come:



Questa operazione è stata ripetuta per tutti i frame acquisiti al fine di ottenere lo spostamento del centro di massa del bastoncino per tutta la durata del movimento.

3.5.4 Velocità del centro di massa del bastoncino

Per il centro di massa del bastoncino, noti lo spostamento ed il tempo durante il quale esso avviene, è dunque possibile calcolare anche la rispettiva velocità, usando la formula [3.8]:



Come già accennato, nell'applicazione della suddetta formula, deve essere prestata estrema attenzione alla definizione della corretta unità di misura.

Si deve 'plottare' tale velocità in un apposito grafico, come riportato in figura 3.6a. La velocità (espressa in m/sec) è rappresentata in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Figura 3.6a: velocità tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino
(fase di lancio con salita e discesa lungo la direzione verticale).

Si deve quindi leggere/interpretare tale grafico:

- a) la velocità del centro di massa del bastoncino è prossima allo 0 sino al momento nel quale il soggetto inizia il movimento di lancio (si osserva anche un leggero contro-movimento involontario del soggetto);
- b) in questo istante, il centro di massa acquisisce una velocità positiva che aumenta sino al momento nel quale il bastoncino si stacca dalla mano del soggetto; ed
- c) oltre questo momento, tale velocità positiva diminuisce sino all'istante nel quale il bastoncino tocca nuovamente terra;
- d) oltre questo istante, la velocità positiva aumenta nuovamente per effetto del rimbalzo a terra; ed
- e) ovviamente, superata questa fase la velocità positiva del centro di massa diminuisce progressivamente sino a raggiungere nuovamente il valore nullo (figura 3.6b).

Dunque, la semi-parabola ascendente di lancio del bastoncino corrisponde ad una progressiva diminuzione di velocità positiva (accelerazione negativa); la semi-parabola discendente ad un progressivo aumento di velocità negativa (sempre accelerazione negativa).

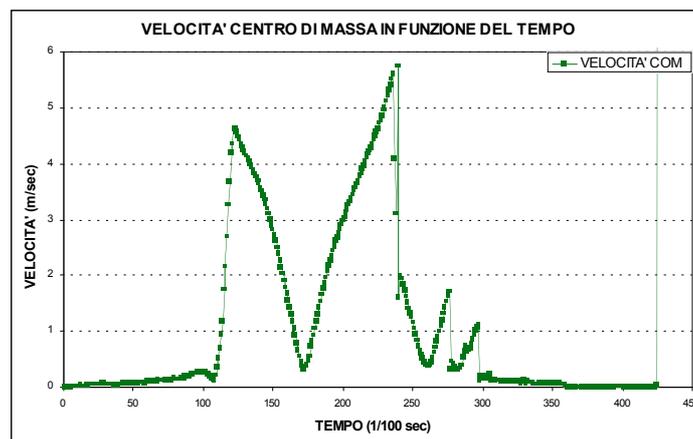


Figura 3.6b: velocità tri-dimensionale del centro di massa del bastoncino
(tutta la durata del movimento).

3.5.5 Energia cinetica, potenziale e totale del centro di massa del bastoncino

La velocità totale calcolata [3.8] serve dunque per calcolare le corrispondenti energia cinetica (EK), energia potenziale (EP) ed energia totale (ET), come da formule presentate e discusse precedentemente.

Si devono 'plottare' tali energie in un apposito grafico, come riportato in figura 3.7 . Ciascuna energia (EK, EP e ET, espresse in J) è rappresentata in funzione della variabile tempo (espressa in centesimi di secondo).

Come si può vedere dal grafico, l'andamento dell'energia cinetica, come prevedibile, è speculare a quello dell'energia potenziale e viceversa.

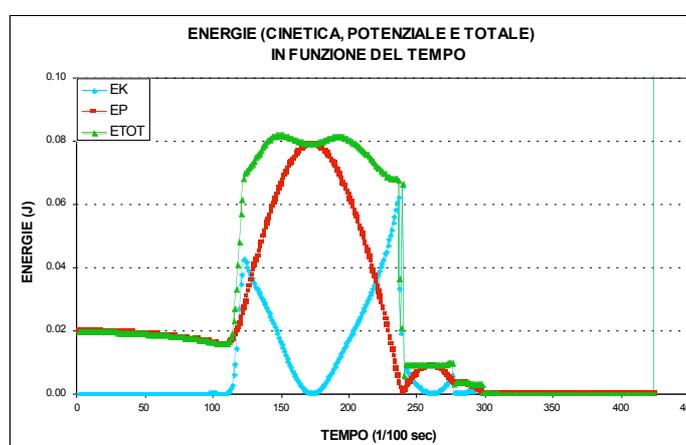


Figura 3.7: energie (cinetica, potenziale e totale) del centro di massa del bastoncino.

Nello specifico:

- l'energia cinetica (colore azzurro) aumenta nella fase iniziale sino al momento in cui il bastoncino si stacca dalla mano dell'operatore. Durante la fase ascendente di volo del bastoncino, essa però diminuisce sino al valore minimo all'istante nel quale si raggiunge la massima altezza di volo (in verticale, c'è solo energia potenziale), per poi aumentare nuovamente nella fase discendente (recupero di velocità e dunque di energia cinetica);

- b) *viceversa, l'energia potenziale (colore rosso) diminuisce nella fase iniziale del movimento (bastoncino sulla mano del soggetto) per la presenza del contro-movimento. Nel momento in cui il bastoncino si stacca dalla mano, essa comincia ad aumentare sino al raggiungimento della massima altezza di volo (fase ascendente). Raggiunta la quale, essa diminuisce sino al valore nullo finale (fase discendente); e*
- c) *l'energia totale (colore verde) diminuisce anche essa leggermente nella fase iniziale del movimento (bastoncino sulla mano del soggetto) per la presenza del contro-movimento. Essa aumenta nel momento in cui il bastoncino si stacca dalla mano. Da questo momento sino a quello nel quale il bastoncino tocca terra, essa assume un valore costante pari alla somma dei due contributi energetici. Dopo che il bastoncino ha toccato terra, come prevedibile, essa assume un valore nullo.*

3.6 CONCLUSIONI

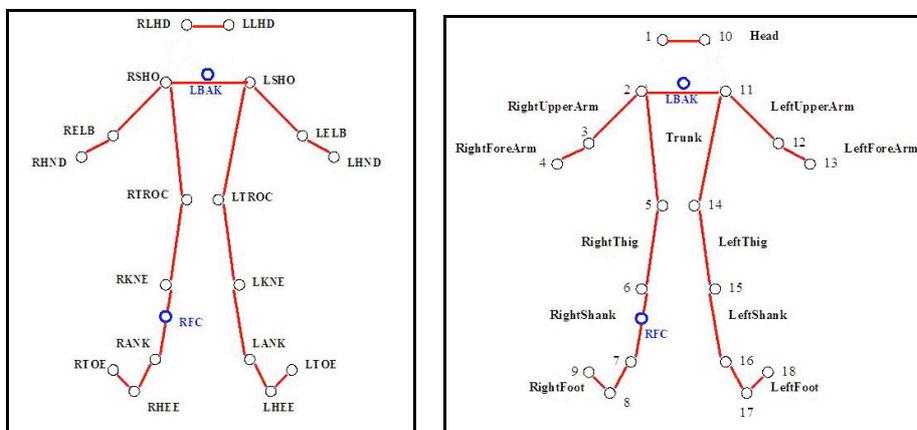
Il moto di un bastoncino e del suo centro di massa durante un lancio verticale è stato indagato in tutte le sue principali componenti (spostamento tri-dimensionale, velocità e contributi energetici).

Si possiedono quindi le conoscenze fisico/cinematiche per la sua analisi ed un'eventuale trasposizione anche con altri tipi di oggetti.

4 ACQUISIZIONE di una PROVA STATICA

4.1 SIGNIFICATO

Come già ampiamente sottolineato precedentemente, il sistema fornisce *solo* coordinate tri-dimensionali di marker *anonimi* che si muovono nel volume. È quindi necessario associare al marker generico il significato per esempio di pallina, estremità di bastoncino od articolazione del corpo umano. A questo scopo, si scrive il modello di Labeling del caso (Marker Set: figura 4.1 e 4.2). Come e più che per esempio nel caso del lancio parabolico della pallina, occorre aggiungere marker e segmenti che li congiungano a significato puramente tecnico. Il loro scopo sarà quindi di supporto per il corretto Labeling. Prima di registrare un qualsiasi movimento, periodico – cicli locomotori – o no – un salto, è di aiuto, per facilitarne e velocizzarne un Labeling semi-automatico, registrare una postura statica del soggetto oggetto di studio, solo per qualche secondo ed in una posizione che metta ampiamente in mostra quanti più marker possibili a quante più telecamere possibili. Il risultato di tale tipo di registrazione di prova statica è un'Autolabel Calibration, utile finché 1) si mantiene la calibrazione del sistema corrente; 2) si studia lo stesso soggetto e 3) si mantiene la stessa posizione dei marker sul suo corpo. In seguito alle successive registrazioni di prove dinamiche (cicli locomotori, salto...), non sarà più necessario applicare *manualmente* ogni volta il Marker Set scelto, ma – quasi sempre (quasi per tutta la durata dell'acquisizione) – basterà applicare l'Autolabel Calibration precedentemente creata.



5 CINEMATICA della LOCOMOZIONE

5.1 MARCIA

1) Si registrano 60" di marcia in piano alla velocità di 4 km h^{-1} . Prima della registrazione, il soggetto dovrebbe cercare di abituarsi il più possibile alla condizione di locomozione su treadmill, ovvero a velocità costante e direzione e verso obbligati. Durante la registrazione, il soggetto dovrebbe cercare di marciare in maniera regolare e limitando il più possibile lo spostamento in direzione antero-posteriore, ovvero cercando di progredire alla stessa velocità del nastro. 2) Dopo la registrazione, si applica l'Autolabel Calibration precedentemente creata come risultato dell'acquisizione della prova statica (figura 5.1). 2b) In caso di mancato o parziale Labeling, si deve procedere manualmente. Si ottiene quindi un file in formato *.c3d, il formato attualmente più diffuso in biomeccanica. Si passa quindi ad un PC a piattaforma Power Mac. 3) Utilizzando un *.vi LabVIEW 6.1 disponibile in rete, _C3D/1.vi.vi (figura 5.2), si converte il *.c3d in *.txt. 4) Utilizzando il *.vi LabVIEW 2.2.1 non commerciale ViconGraph (figura 5.3), si ispeziona visivamente la registrazione e si individuano gli estremi di n cicli locomotori interi. 5) Utilizzando il *.vi LabVIEW 6.1 non commerciale extract 18mrk.vi (figura 5.4), si 'tagliano' gli n cicli precedentemente individuati, avendo però cura di aggiungercene 5 all'inizio in previsione del successivo filtraggio (operazione che permetterà di trascurare rumore-irregolarità della registrazione dovute alla modalità di registrazione stessa). 6) Utilizzando il *.vi LabVIEW 2.2.1 non commerciale Motion Analysis Filter (figura 5.5), previo input di sigla di 3 lettere, altezza e massa del soggetto, si filtra la registrazione e si calcolano – frame per frame – le coordinate tri-dimensionali del BCOM (file *.bcm) e – come media degli n valori degli n cicli – i valori di molte variabili biomeccaniche: 7) Utilizzando il *.vi LabVIEW 7.1 non commerciale LissajousFourier ed a partire dalle coordinate del BCOM, si calcolano le serie di Fourier troncate alla 6^a armonica rappresentative dei valori sperimentali (figura 5.6). 8) Infine, utilizzando gli *.xls non commerciali _template.res ed Energies from Lissajous, si calcolano – come valore della funzione rappresentativa dei valori sperimentali – di alcune delle variabili biomeccaniche di cui sopra: lavoro meccanico esterno positivo e recupero percentuale.

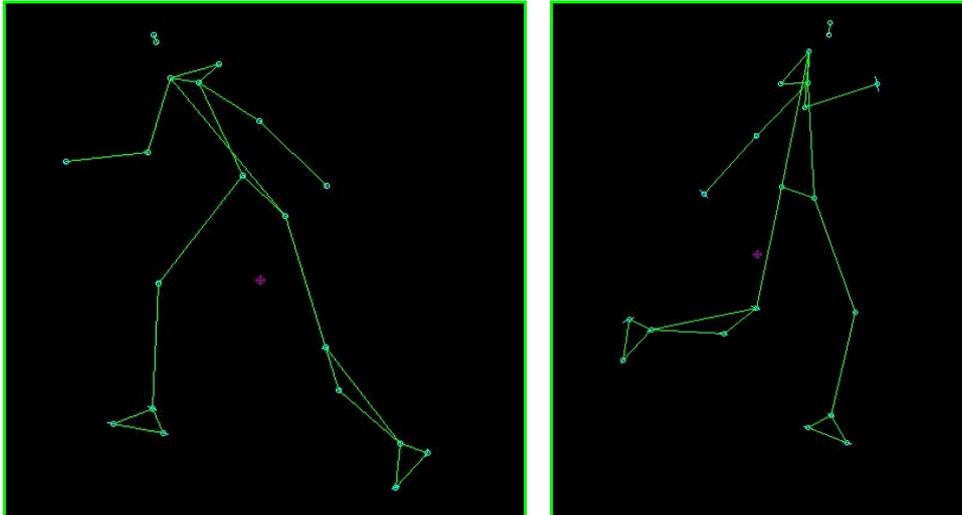


Figura 5.1: stick diagram durante una prova di marcia in pendenza.

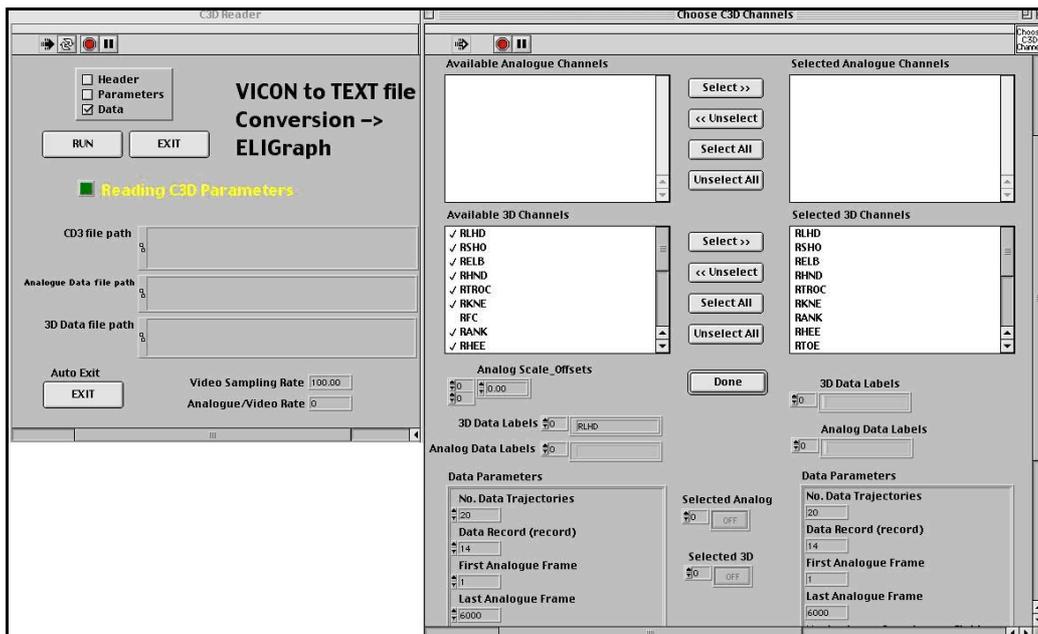


Figura 5.2: _C3D/1.vi.vi in LabVIEW 6.1 .

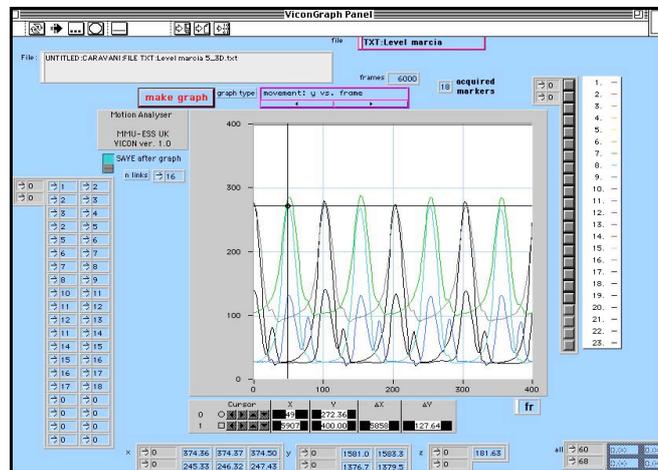
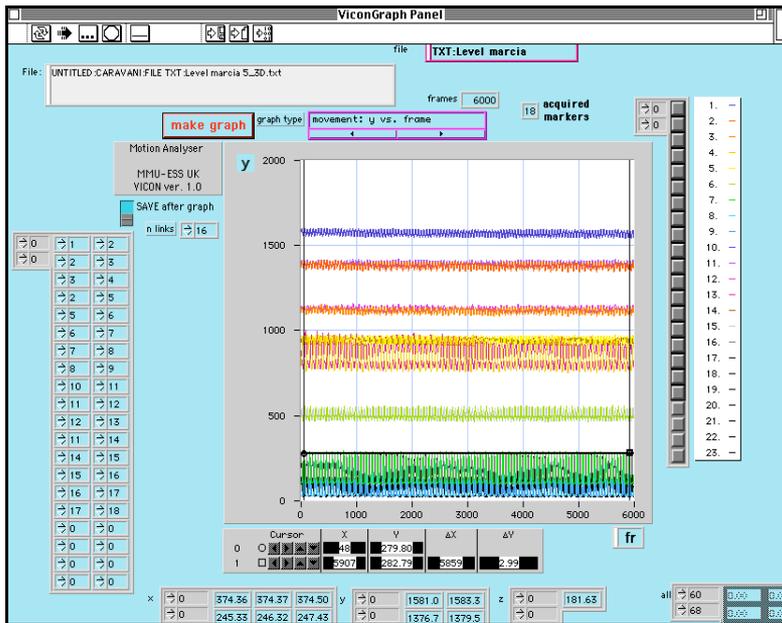


Figura 5.3: ViconGraph in LabVIEW 2.2.1 .

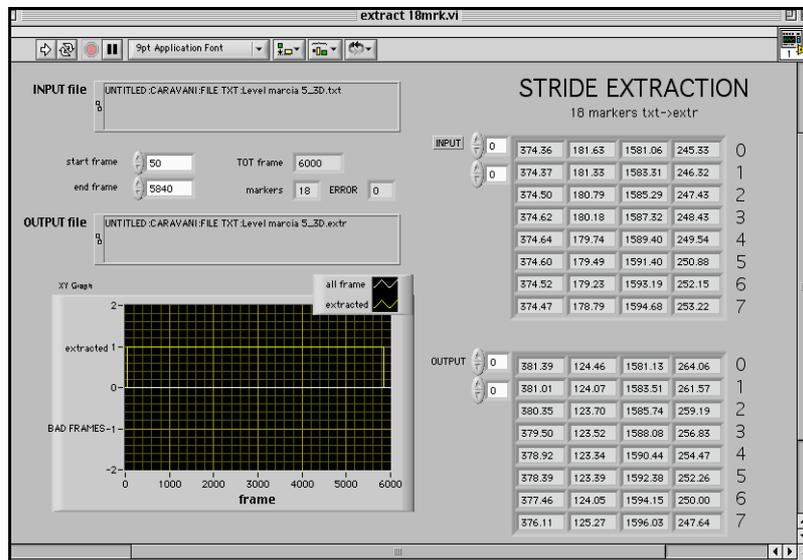
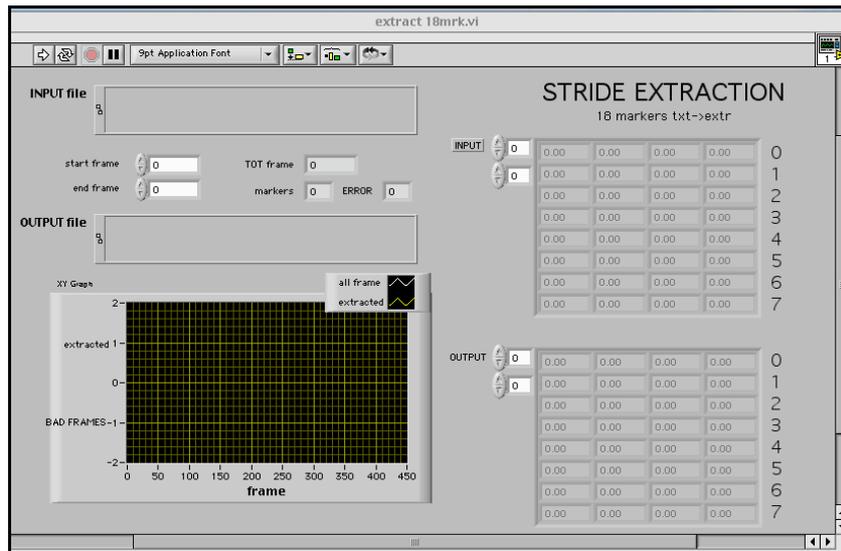


Figura 5.4: extract 18mrk.vi in LabVIEW 6.1 .

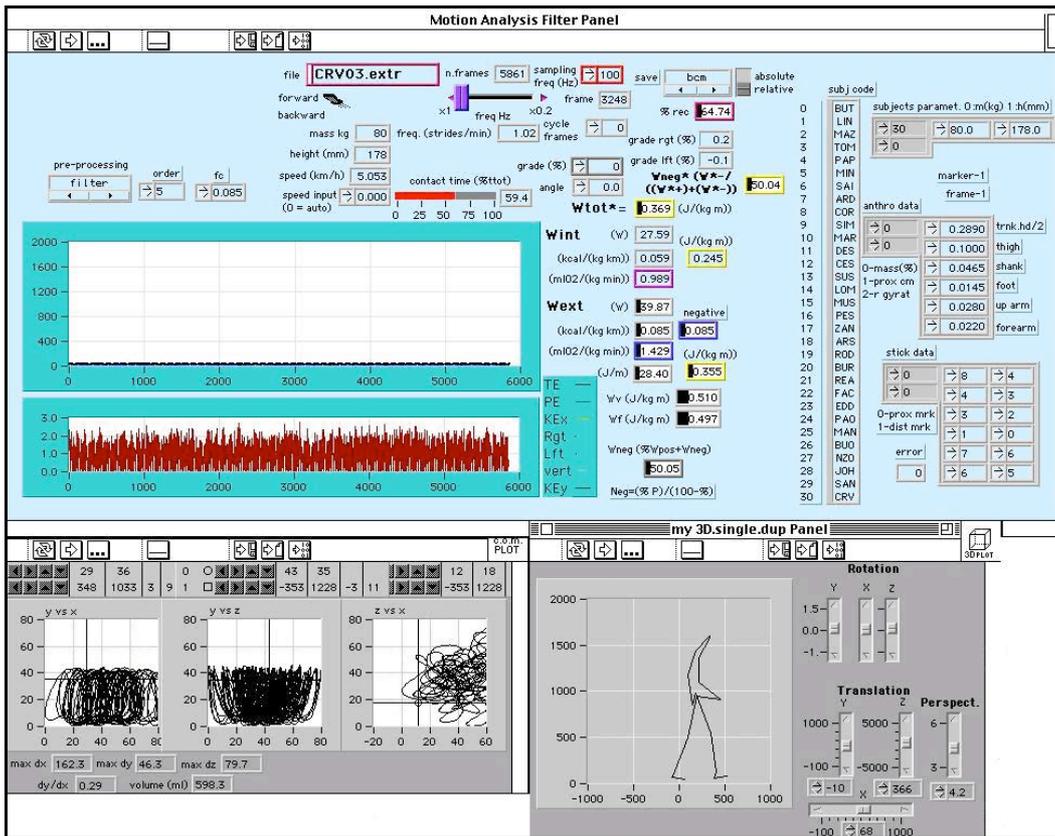


Figura 5.5: Motion Analysis Filter in LabVIEW 2.2.1 .

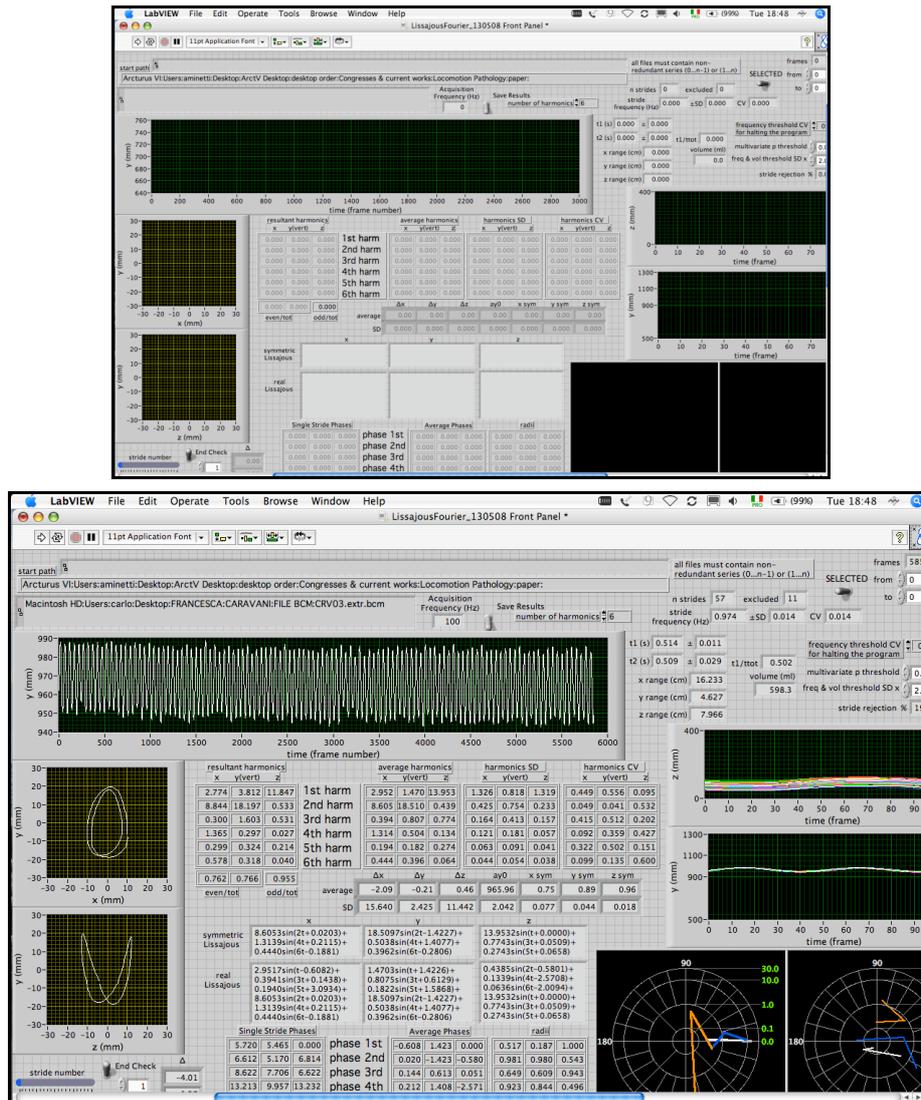


Figura 5.6: LissajousFourier in LabVIEW 7.1 .

5.2 CORSA

1) Si registrano 60" di corsa in piano alla velocità di 10 km h⁻¹. Prima della registrazione, il soggetto dovrebbe cercare di abituarsi il più possibile alla condizione di locomozione su treadmill, ovvero a velocità costante e direzione e verso obbligati. Durante la registrazione, il soggetto dovrebbe cercare di correre in maniera regolare e limitando il più possibile lo spostamento in direzione antero-posteriore, ovvero cercando di progredire alla stessa velocità del nastro. 2) Dopo la registrazione, si applica l'Autolabel Calibration precedentemente creata come risultato dell'acquisizione della prova statica (figura 5.7). 2b) In caso di mancato o parziale Labeling, si deve procedere manualmente. Si ottiene quindi un file in formato *.c3d, il formato attualmente più diffuso in biomeccanica. Si passa quindi ad un PC a piattaforma Power

Mac. **3)** Utilizzando un *.vi LabVIEW 6.1 disponibile in rete, _C3D/1.vi.vi, si converte il *.c3d in *.txt. **4)** Utilizzando il *.vi LabVIEW 2.2.1 non commerciale ViconGraph, si ispeziona visivamente la registrazione e si individuano gli estremi di n cicli locomotori interi. **5)** Utilizzando il *.vi LabVIEW 6.1 non commerciale extract 18mrk.vi, si 'tagliano' gli n cicli precedentemente individuati, avendo però cura di aggiungercene 5 all'inizio in previsione del successivo filtraggio (operazione che permetterà di trascurare rumore-irregolarità della registrazione dovute alla modalità di registrazione stessa). **6)** Utilizzando il *.vi LabVIEW 2.2.1 non commerciale Motion Analysis Filter, previo input di sigla di 3 lettere, altezza e massa del soggetto, si filtra la registrazione e si calcolano – frame per frame – le coordinate tri-dimensionali del BCOM (file *.bcm) e – come media degli n valori degli n cicli – i valori di molte variabili biomeccaniche: **7)** Utilizzando il *.vi LabVIEW 7.1 non commerciale LissajousFourier ed a partire dalle coordinate del BCOM, si calcolano le serie di Fourier troncate alla 6^a armonica rappresentative dei valori sperimentali. **8)** Infine, utilizzando gli *.xls non commerciali _template.res ed Energies from Lissajous, si calcolano – come valore della funzione rappresentativa dei valori sperimentali – di alcune delle variabili biomeccaniche di cui sopra: lavoro meccanico esterno positivo e recupero percentuale.

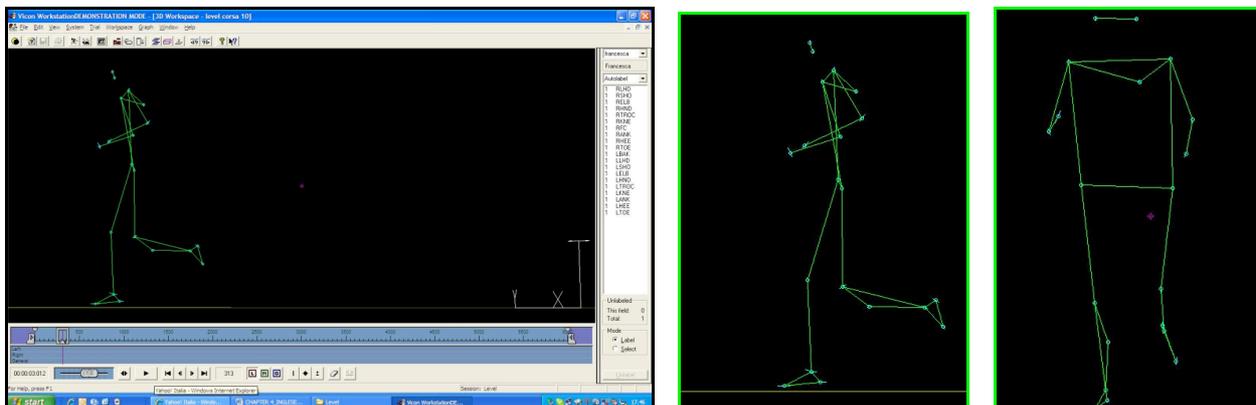


Figura 5.7: stick diagram durante una prova di corsa.