



BIOMECCANICA DEL MOVIMENTO UMANO

3. Misura del movimento tramite fotogrammetria su piccola scala

Fabio Gazzani, *Laboratorio di Ingegneria Biomedica, Istituto Superiore di Sanità, Roma*

3.1 Introduzione

Per misura del movimento si intende la determinazione numerica, istante per istante, della posizione spaziale di oggetti in moto. L'insieme dei metodi che permettono di misurare il movimento (ad esempio quello dell'uomo, oppure di oggetti come gli attrezzi sportivi) si chiama "fotogrammetria su piccola scala", che si distingue dalla fotogrammetria su grande scala in quanto quest'ultima tratta di oggetti di grandi dimensioni. Per questo tipo di misure biomeccaniche vengono usati strumenti che possono differire di molto quanto a complessità, principio di funzionamento, costo etc., ma i principi generali utilizzati sono in via di massima gli stessi, e si rifanno a nozioni e concetti che vengono raggruppati sotto il nome di fotogrammetria analitica. I risultati delle misure di movimenti permettono, dopo opportuna elaborazione, di ricavare le velocità ed accelerazioni di punti di interesse. Infine, una loro corretta interpretazione può consentire un'analisi assai dettagliata dell'esercizio fisico di volta in volta esaminato.

3.2 Definizione del problema

La misura del movimento si riduce in definitiva a quella della posizione spaziale di punti facenti parte degli oggetti sotto analisi. Tali oggetti possono essere parti del corpo (i cosiddetti segmenti corporei), attrezzi sportivi, etc; su di loro saranno apposti dei contrassegni, o punti di repere, di cui si misura appunto la posizione spaziale. Si ricordi che, secondo un basilare principio di geometria dei corpi rigidi, la posizione spaziale di un solido è nota se lo è quella di tre punti non allineati che ne fanno parte (Fig. 1).

Si definisce posizione spaziale di un punto P, che è da considerare equivalente ad un contrassegno, l'insieme delle sue tre coordinate \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} in un sistema di riferimento cartesiano ed ortogonale, formato dai tre assi X, Y, Z, che si dipartono dall'origine O (Fig. 2). Lo spazio che questi tre assi definiscono viene definito in fotogrammetria analitica "spazio oggetto", ed è nella maggior parte dei casi da considerare solidale con il laboratorio in cui si effettuano le misure. La posizione del punto O e la direzione dei tre assi è

comunque arbitraria e lasciata alla convenienza contingente. Sapere come si muove il punto P equivale a conoscere i valori assunti dalle sue tre coordinate in tutti gli istanti di un certo intervallo di tempo $[t_1, \div t_2]$ in cui ciò interessa. In altre parole, e per usare una terminologia più formale, occorre conoscere tre funzioni $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$, con $t_1 \leq t \leq t_2$. Senonché, qualunque metodo fotogrammetrico per la misura della posizione di P si pensi di usare, esso potrà fornire il valore delle tre funzioni non in tutti gli istanti di tempo dell'intervallo definito, ma in un numero finito, per quanto grande, di essi. In genere la misura è eseguita ad intervalli regolari di durata dell'ordine di grandezza dei millisecondi (ms). Tale caratteristica è quantificata dalla frequenza di campionamento del sistema di analisi del movimento. Per campione, in tale contesto, si intende l'insieme di tutte le grandezze il cui valore si deve misurare contemporaneamente; nel caso di un solo contrassegno, ad esempio, il campione è costituito dalle sue tre coordinate nello spazio oggetto.

In molte applicazioni, il moto si sviluppa prevalentemente in due dimensioni; ciò accade ad esempio, e tipicamente, in movimenti come le corse ed i salti, in cui il

moto di tutti i punti del corpo resta confinato nelle vicinanze di piani paralleli al piano sagittale del soggetto. In questi casi, è possibile adottare un sistema di riferimento spaziale tale che una delle tre coordinate sia da considerare nota a priori (come la Y in Fig. 1), cosicché le altre due siano sufficienti a determinare la posizione di P. In tali casi si parla sinteticamente di misure bidimensionali o 2D, in opposizione a quelle tridimensionali o 3D. Una strumentazione adatta a misure in 2D è in genere assai più semplice del corrispettivo 3D, come si vedrà meglio in seguito.

Si passa ora ad esaminare alcune nozioni di fotogrammetria analitica indispensabili in qualunque tipo di misura del movimento.

3.3 Principi di fotogrammetria analitica

3.3.1 Definizioni

Virtualmente tutti i metodi di misura del movimento si basano sul principio della proiezione geometrica del punto P che rappresenta il contrassegno su opportuni piani, che nel caso di uso di tecniche foto-

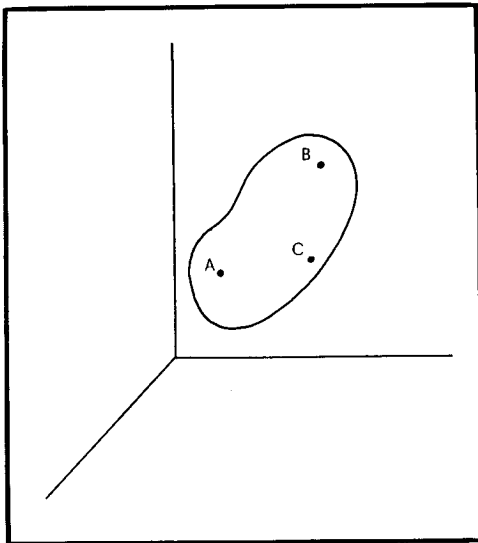


Fig. 1 - La posizione spaziale di un corpo rigido è completamente determinata se lo è quella di tre punti A, B, C che ne fanno parte.

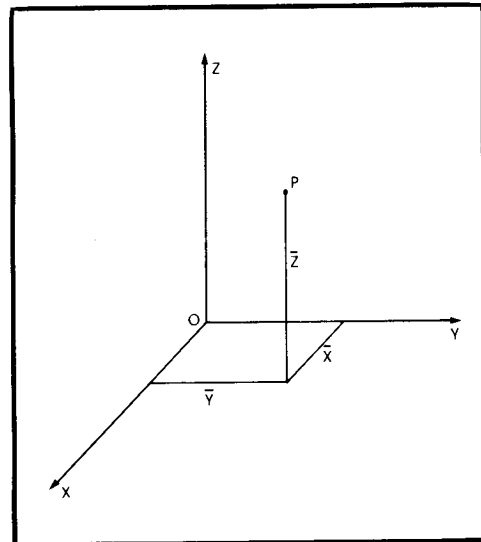


Fig. 2 - La posizione spaziale di un punto P è definita dalle sue tre coordinate \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} .

grafiche coincidono con i piani delle lastre fotografiche. Si consideri la Fig. 3: P viene proiettato, lungo la linea r , sul piano immagine s , attraverso il centro di prospettiva N , determinando la proiezione I . N è comunemente definito punto nodale. La linea p perpendicolare ad s e passante per il punto nodale è l'asse ottico; esso intercetta il piano immagine nel punto principale N' , e la distanza $N'N$ è detta distanza focale (f). Un apparato atto ad eseguire tale proiezione verrà definito camera, anche se non conserva materialmente nulla della costituzione fisica della camera oscura. Nel caso estremamente comune di uso di foto o cinecamere, in cui come detto il piano immagine coincide con quello della lastra fotografica, il punto nodale viene determinato dal sistema di lenti che formano l'obiettivo. La terminologia sopra istituita è di impiego generale in fotogrammetria analitica. Essa rimane essenzialmente valida anche per quei dispositivi che non si basano su materiale fotografico e, persino, non hanno sistemi ottici convenzionali, come sopra si vedrà in seguito.

Si ipotizzi ora che la posizione del contrassegno sia incognita, e che siano invece noti tutti i parametri relativi alla

camera, come la posizione del punto nodale N nello spazio oggetto, la distanza focale f , la direzione dell'asse ottico p , ed infine la proiezione I sul piano immagine. È chiaro allora che saremo in grado di tracciare la linea r su cui giace il contrassegno P . Se si immagina ora di disporre di un altro piano di proiezione s_1 , per cui valgano le stesse considerazioni di prima (Fig. 4), si avrà un'altra linea r_1 su cui deve giacere P ; la sua posizione 3D sarà così determinata dalla intersezione di r ed r_1 . Ciò costituisce il principio base della cosiddetta stereofotogrammetria, e cioè che per ottenere le coordinate 3D di un contrassegno, occorre disporre di almeno di due sue proiezioni su altrettanti piani sensori.

Naturalmente, per localizzare esattamente la posizione di un punto immagine sul relativo piano, si deve istituire su quest'ultimo un sistema di assi cartesiani ortogonali (Fig. 6). La loro origine O' , orientazione e fattori di scala relativi agli assi x ed y sono da considerare arbitrari; nelle camere non metriche, descritte più avanti, tali assi vengono generalmente definiti facendo riferimento a opportuni contrassegni fissi nello spazio oggetto (O' ed A' in Fig. 6).

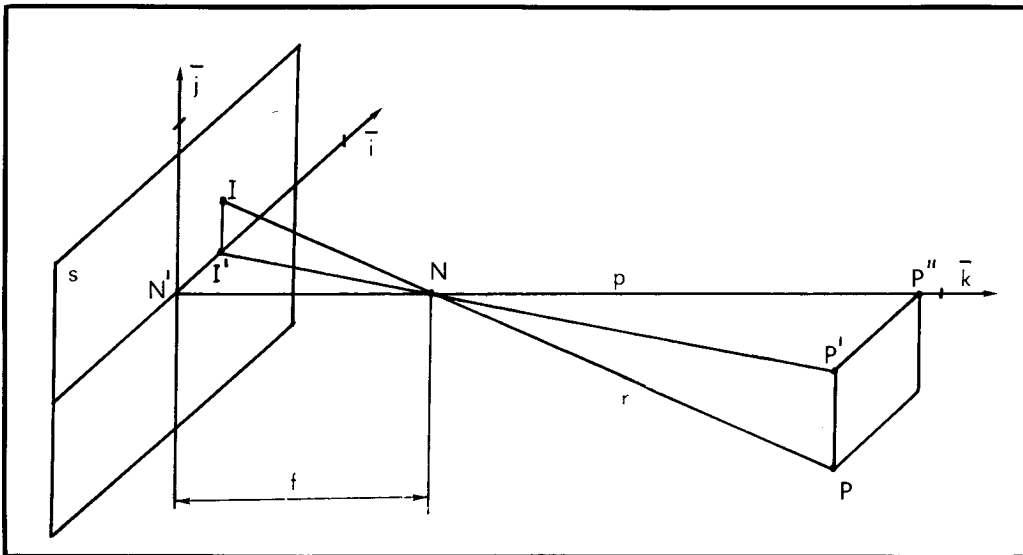


Fig. 3 - Principio generale della proiezione di un contrassegno P su un piano immagine s , attraverso il punto nodale N , così ottenendo il punto immagine I . Gli altri simboli sono spiegati nel testo.

3.3.2 Le equazioni di collinearità e la Trasformazione Lineare Diretta

Si vuole ora scrivere una relazione matematica che correli le coordinate X, Y, Z nello spazio oggetto di un contrassegno P, con le coordinate immagini x ed y, ad esso relative dopo misura con una camera. Siano (Fig. 3) \bar{i} e \bar{j} due vettori unitari giacenti lungo i due assi immagine. Sia \bar{k} il vettore unitario giacente lungo l'asse ottico ed f la distanza focale. Dalla costruzione di Fig. 3 si evince che:

$$\begin{aligned} \bar{T}' \bar{N}' &= -f \frac{\bar{P}' \bar{P}''}{\bar{N}' \bar{P}''} = -f \frac{\bar{i} * (P - N)}{k * (P - N)} \\ \bar{T}' \bar{T}' &= -f \frac{\bar{P}' \bar{P}''}{\bar{N}' \bar{P}''} = -f \frac{\bar{j} * (P - N)}{k * (P - N)} \end{aligned} \quad (1)$$

ove (P - N) denomiina il vettore che va da N a P e * significa operazione di prodotto scalare. Siano poi x_0 ed y_0 le due coordinate immagini che vengono lette dalla camera quando l coincide col punto principale, l_x ed l_y i fattori di scala relativi ai due assi x ed y. Varranno le due relazioni:

$$\begin{aligned} x &= l_x \bar{T}' \bar{N}' + x_0 \\ y &= l_y \bar{T}' \bar{T}' + y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Se poi X_n, Y_n, Z_n sono le coordinate 3D del punto principale N, $i_x, i_y, i_z, j_x, j_y, j_z, k_x, k_y, k_z$ le componenti dei vettori unitari $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$, sostituendo le (1) nelle (2) si ottengono le seguenti "equazioni di collinearità":

$$x = x_0 - c_x \frac{(X-X_n) j_x + (Y-Y_n) j_y + (Z-Z_n) j_z}{(X-X_n) k_x + (Y-Y_n) k_y + (Z-Z_n) k_z} \quad (3)$$

$$y = y_0 - c_y \frac{(X-X_n) i_x + (Y-Y_n) i_y + (Z-Z_n) i_z}{(X-X_n) k_x + (Y-Y_n) k_y + (Z-Z_n) k_z}$$

in cui $c_x = -f/l_x, c_y = -f/l_y$.

Dalle (3) si deduce prontamente che, conosciute le due coordinate immagini x ed y, si viene a disporre di due relazioni che legano le tre incognite X, Y, Z. Ciò non corrisponde ad altro che alla conoscenza della equazione della retta r su cui giace P, purché siano noti tutti i parametri fotogrammatici prima definiti. Uno dei problemi principali che si pongono nella misura del movimento è proprio quello della disponibilità di tali parametri per tutte le camere. La operazione attraverso cui essi vengono determinati viene di solito detta "calibrazione". Si usa spesso raggruppare i parametri fotogrammetrici relativi ad una camera in due categorie: esterni ed interni. I parametri esterni sono quelli relativi alla posizione del punto principale ad all'orientamento del piano immagine nello spazio oggetto: $X_n, Y_n, Z_n, \bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$. I parametri interni sono la distanza focale f, i fattori di scala l_x ed l_y , le coordinate immagine del punto principale x_0 ed y_0 . Un metodo di calibrazione consisterà così in una procedura che permetta di stimare o misurare direttamente i parametri interni ed esterni.

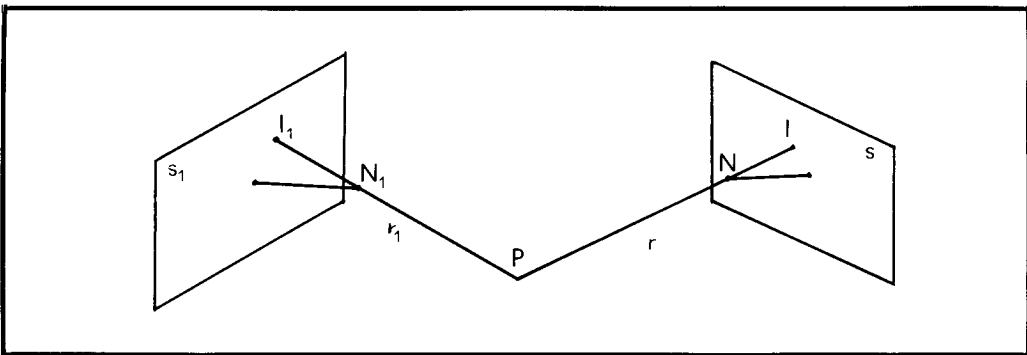


Fig. 4 - Due proiezioni, l ed l1, su altrettanti piani, s ed s1, sono sufficienti a determinare univocamente la posizione spaziale di un contrassegno P.

Un esempio di uso delle equazioni di collinearità è dato in appendice in una versione, detta Trasformazione Lineare Diretta, in cui il loro uso risulta assai semplice anche per il non esperto di fotogrammetria analitica.

Come detto in sede introduttiva, nella analisi del movimento in 2D si misurano le coordinate dei contrassegni nello spazio oggetto rispetto a due soli assi (X e Z nella Fig. 5), nella presunzione di conoscere a priori la terza coordinata, che in genere viene considerata costante o nulla (Y). Tale approssimazione risulta come detto soddisfacente in tutti i casi il moto del soggetto rimane confinato ad un piano, tipicamente quello sagittale, come nelle corse, i salti, alcuni tipi di lanci, etc. Una volta identificato il piano X-Z rispetto al quale si vogliono ottenere le coordinate 2D, si dovrà orientare la cinecamera (o fotocamera), in modo che il suo asse ottico p sia perpendicolare a tale piano, il quale risulterà così parallelo al piano immagine (Fig. 5). Per ricavare le due coordinate incognite di un contrassegno P giacente su X-Z (cioè con Y=0), occorre che su un fotogramma siano visibili l'origine O dello spazio oggetto, ed un punto A giacente sull'asse X (Fig. 6). Si potranno infatti trac-

ciare gli assi ortogonali x e z sul piano immagine unendo O' ad A' (asse x) e tirando la perpendicolare da O' (asse z). Misurate le coordinate immagine di P, x' e z', con stessa scala sui due assi si avrà:

$$X = Fx', Z = Fz'$$

in cui F è il fattore di scala $F = \overline{O\bar{A}}/\overline{O'\bar{A}'}$. $\overline{O\bar{A}}$ dovrà essere misurato ovviamente con la stessa unità di misura con cui si sono ricavate x' e z'. Allorquando invece P non stia su X-Z, ma abbia seconda coordinata pari a \bar{Y} , le due coordinate oggetto incognite possono essere calcolate se sono noti la distanza L tra piano di riferimento X-Z ed il punto principale della camera, e le coordinate oggetto X_n e Z_n di quest'ultimo (Fig. 5). Ai valori X e Z prima ricavati vanno ora aggiunti dei termini detti "errore di parallasse" (Fig. 7):

$$X = Fx' - (Fx' - X_n) \bar{Y}/L$$

$$Z = Fz' - (Fz' - Z_n) \bar{Y}/L$$

Tramite misure in 2D si può effettuare quella che può essere chiamata una falsa analisi tridimensionale. Essa consiste nell'usare contemporaneamente due proiezioni del movimento su due piani verticali e tra di loro perpendicolari. Ad

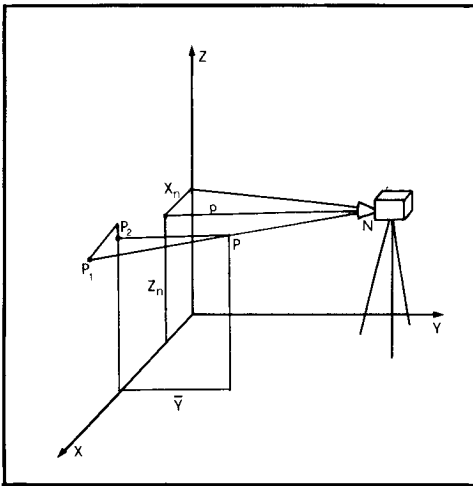


Fig. 5 - Configurazione sperimentale da adottare per la misura di movimenti bidimensionali (2D) lungo il piano X-Z. L'asse principale p della camera è perpendicolare al piano X-Z. La presenza di una coordinata Y non nulla introduce un errore di parallasse che è pari alla distanza tra P' e P''.

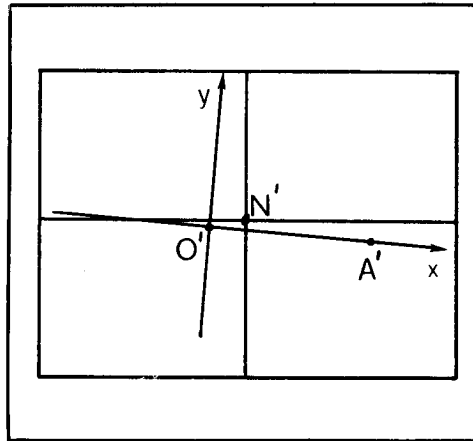


Fig. 6 - Rappresentazione di un piano immagine e di un sistema di riferimento cartesiano ortogonale su di esso istituito, con origine non coincidente con il punto principale N'. O' ed A' sono le proiezioni di due contrassegni esterni. O ed A.

esempio, nel caso di movimenti locomotori, uno può giacere lungo il piano sagittale del soggetto, l'altro sul piano frontale. In tal modo, si ottengono le coordinate spaziali approssimate dei contrassegni, senza ricorrere alla più complessa fotogrammetria 3D.

Sinora si è genericamente parlato di proiezione dei contrassegni su piani immagine, senza specificare la costituzione materiale di tali piani e le tecniche di rilevazione delle posizioni dei punti immagine. Fino a pochi anni fa la misura del movimento tramite fotogrammetria su piccola scala sottointendeva di fatto l'uso di camere fotografiche e cinematografiche. In questo caso il punto principale e tutti i parametri fotogrammetrici interni sono determinati dal sistema ottico, e possono essere misurati con una certa precisione. Esistono anche in commercio delle camere, dette metriche, i cui parametri fotogrammetrici interni sono noti con elevata accuratezza, in seguito a misura fatta dal costruttore. Nella biomeccanica del movimento è invalso però l'uso di camere non metriche. Si è infatti constatato che un buon apparecchio commerciale, di facile reperibilità sul mercato e basso costo, ha precisione sufficiente per le comuni esigenze.

Come accennato precedentemente, al giorno d'oggi la misura del movimento non è più eseguita solo attraverso materiale fotografico; sono apparsi infatti numerosi sistemi basati su dispositivi optoelettronici. In essi, la lastra fotografica è sostituita da un sensore o trasduttore che svolge la stessa funzione, in quanto capace di misurare la posizione sul piano immagine delle proiezioni dei contrassegni. Il vantaggio offerto da tali strumenti, rispetto a quelli convenzionali, sta nel fatto che le coordinate immagine vengono automaticamente e velocemente misurate dal sensore, e poi trasferite nella memoria di un calcolatore, riducendo od addirittura annullando l'intervento manuale dell'operatore. Tale intervento è invece assai massivo e dispendioso nelle tecniche fotografiche, laddove ci si confronta pure con procedimenti quali lo sviluppo della pellicola, l'ingrandi-

mento, la stampa, etc., che possono facilmente dare luogo ad un degradamento dell'informazione e conseguente introduzione di errori.

3.4 L'errore di distorsione

In quanto detto finora, non si sono prese in considerazione le problematiche relative ai già citati errori introdotti dagli ordinari processi fotografici: sviluppo, ingrandimento, stampa, etc. Né, inoltre, si sono considerate le distorsioni prodotte dal sistema ottico, le quali hanno spesso una tipica configurazione, tale per cui i vari punti vengono dislocati radialmente rispetto al punto principale, come si preciserà in seguito.

Per quanto riguarda il primo tipo di problema, esso risulta superabile solo ponendo grande attenzione alla esecuzione dei succitati processi fotografici, cercando di evitare deformazioni del film, disallineamenti durante l'ingrandimento, ed altri possibili deterioramenti dell'informazione residente sulla pellicola. Infatti tali errori risultano di tipo non ripetitivo, e perciò difficilmente correggibili mediante opportuni algoritmi matematici.

Per quanto invece riguarda il problema della distorsione ottica, esso si pone di solito in maniera pressante solo quando vengono utilizzate le zone più periferiche del campo visivo, laddove tale distorsione è più alta. Al contrario, lavorando in modo di utilizzare prevalentemente la parte centrale del campo, il relativo errore può essere ignorato senza apprezzabile scaldamento dell'accuratezza.

Le tecniche di correzione della distorsione si basano generalmente sull'uso di grigliati formati da linee parallele e perpendicolari che compongono un gran numero di quadrati adiacenti (segmenti rettilinei in Fig. 8). La loro ripresa produce immagini in cui i segmenti divengono linee curve. Da ciò si evince che ogni vertice del quadrato subisce, come anticipato prima, uno spostamento sul piano immagine lungo la linea che lo connette al punto principale N' , e proporzionale alla distanza da esso (ad es. da I a I'). Per questo motivo la distorsione è detta radiale. Misurate le coordinate immagini dei

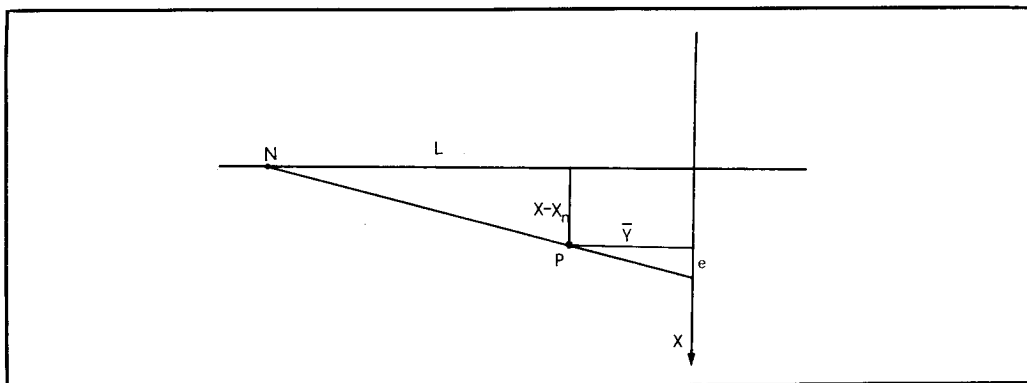


Fig. 7 - Costruzione geometrica per il calcolo dell'errore di parallasse nella misura di movimenti bidimensionali (2D).

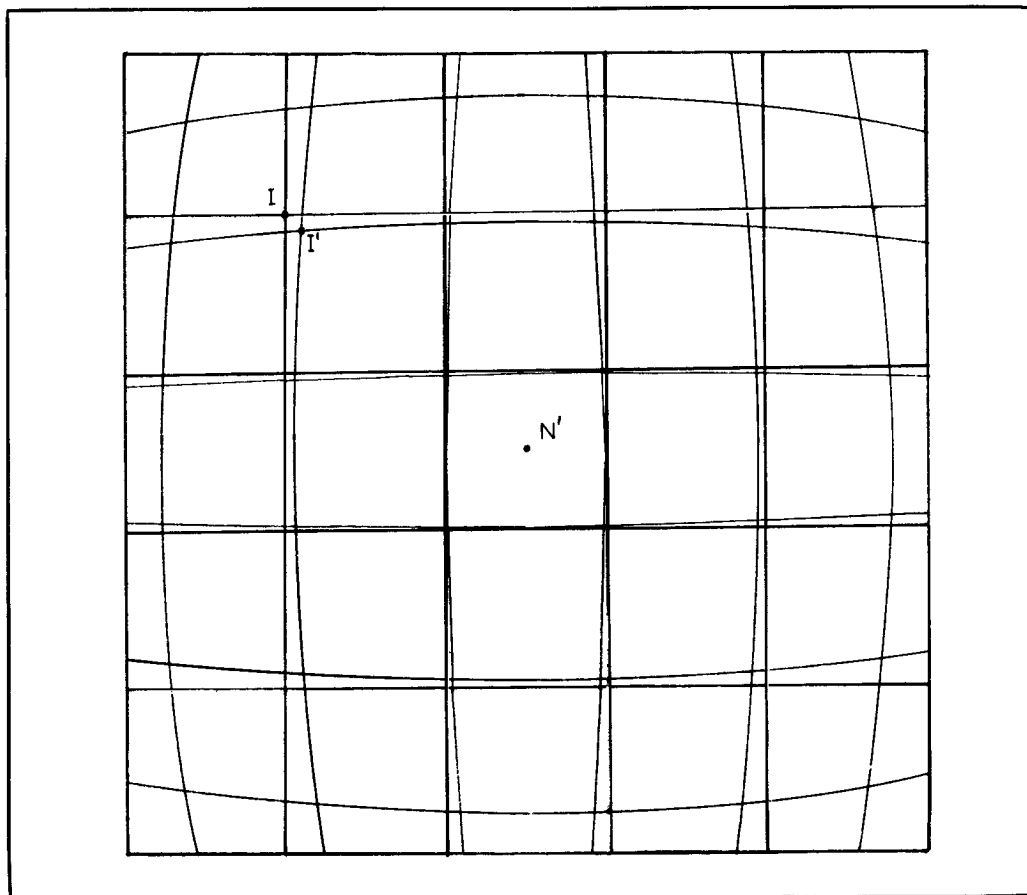


Fig. 8 - Rappresentazione dell'errore di distorsione radiale generato dal gruppo ottico di una camera commerciale. Il punto immagine I viene a spostarsi in I' , in direzione radiale e proporzionalmente alla distanza dal punto principale N' . L'errore è magnificato a scopo di chiarificazione.

immagini dei vertici dei quadrati, e conoscendo le loro coordinate spaziali, non è difficile costruire un modello matematico della distorsione, che permetta cioè di stimare le coordinate immagini indistorte a partire dai valori misurati. E' pratica comune, in fotogrammetria analitica, includere i parametri di tale modello matematico tra i parametri fotogrammetrici interni, assieme a quelli prima definiti.

3.5 Considerazioni sulla selezione della frequenza di campionamento

Come si è detto in precedenza, la misura del movimento viene generalmente fatta ad intervalli fissi, della durata dell'ordine di grandezza dei millisecondi. Il numero di misure in un secondo del complesso delle posizioni di tutti i contrassegni viene definito frequenza di campionamento. La selezione di una frequenza di campionamento appropriata è il frutto di un compromesso: da una parte, è bene che essa sia ragionevolmente alta, allo scopo di non perdere dettagli del movimento che si vuole analizzare. Dall'altra, un valore troppo alto aumenta il numero di dati da gestire, e quindi il tempo occorrente per ridurli ed elaborarli, senza contropartita a livello di contenuto informativo così guadagnato. A tale proposito, è di aiuto un noto teorema della teoria dell'informazione, secondo cui la frequenza di campionamento f necessaria a rappresentare una grandezza che abbia un certo contenuto intrinseco di frequenza F , è: $f \geq 2 \cdot F$. In altre parole, occorre campionare con una frequenza almeno doppia a quella intrinseca. Si noti che quest'ultima si intende la frequenza delle oscillazioni sinusoidali più rapidamente variabili, tra quelle che sono contenute nella funzione del tempo da campionare.

Nel caso che la misura che si sta effettuando sia esente da errori casuali, la relazione $f = 2 \cdot F$ può essere effettivamente usata. Quando invece la misura è "corrotta" da errori, il rapporto tra f ed F deve proporzionalmente aumentare. In genere, un buon criterio può essere quella di imporre $f = 5 \cdot F$.

Quanto ai valori di F che ci si deve aspettare nell'ambito della biomeccanica del movimento, si va dai 7-8 Hz per la deambulazione normale, a circa il doppio per la corsa, e così via.

In quest'ultimo caso, dunque, è appropriato imporre $f = 80$ Hz. Se l'esercizio è invece per esempio un salto da un'altezza di circa 50 cm, un valore da adottare è di circa 120 Hz.

3.6 Misura del movimento mediante tecniche fotografiche

3.6.1 Cinematografia

Come detto, i metodi basati sull'uso di materiale fotografico sono stati i primi ad essere usati, fin dagli albori dello studio del movimento, che risalgono a circa un secolo fa, con il fisiologo Marey. Essi restano a tutt'oggi quelli più frequentemente usati, a causa della scarsa disponibilità ad alto costo delle strumentazioni optoelettriche.

Le due tecniche che tradizionalmente si sono divise il campo, nella misura del movimento, sono la cinematografia e la cronofotografia. Nella prima, il campo di misura in cui si muovono i contrassegni è inquadrato da una o più macchine cinematografiche. Ogni fotogramma sarà relativo ad un solo istante di misura, e la frequenza di campionamento del sistema dipende dal numero di fotogrammi al secondo che le cinecamere permettono di riprendere: dai circa 30 Hz dei modelli commerciali ordinariamente reperibili sul mercato, ai 1000 ed oltre dei modelli professionali per cinematografia ad alta velocità. Uno dei più grossi vantaggi della cinematografia è che essa non necessita l'apposizione sul soggetto di cui si vuole misurare il movimento di contrassegni particolari, come ad es. quelli capaci di emettere lampi di luce che si descriveranno in seguito. Al più, si possono incollare sulle locazioni di interesse (in genere punti di repere anatomici) dei cerchietti di colore ben contrastato rispetto allo sfondo, allo scopo di facilitare la misura delle loro coordinate immagini (Fig. 9). Quest'ultima operazione è eseguibile con

strumenti tipo moviola, che propongono il film un fotogramma alla volta, e dispositivi come grigliati ad esso sovrapposti per una facile ed immediata lettura delle coordinate, oppure digitalizzatori collegati a calcolatore, ecc.

Uno svantaggio della cinematografia sta nel fatto che è difficile sincronizzare due o più camere, nel caso di misure 3D. Infatti l'applicazione delle equazioni di parallasse, o di qualunque algoritmo ricostruttivo stereometrico, richiede che i punti immagine su ciascun piano di proiezione siano relativi allo stesso istante. Tale sincronia non è facile da realizzare con le usuali macchine cinematografiche;

ne consegue che per la maggior parte dei casi la tecnica viene usata per misure in 2D, cioè bidimensionali. Tale tecnica è stata descritta con un certo dettaglio, per quanto riguarda la parte analitica, in sezione 3.3.2.

3.6.2 Cronofotografia e Chimofotografia

Come rimarcato durante la descrizione delle tecniche di misura del movimento mediante cinematografia, questo metodo ha lo svantaggio di prestarsi poco alle misure 3D, a causa della difficoltà di sincronizzazione tra di loro o più cinecamere. La cronofotografia si indirizza alla

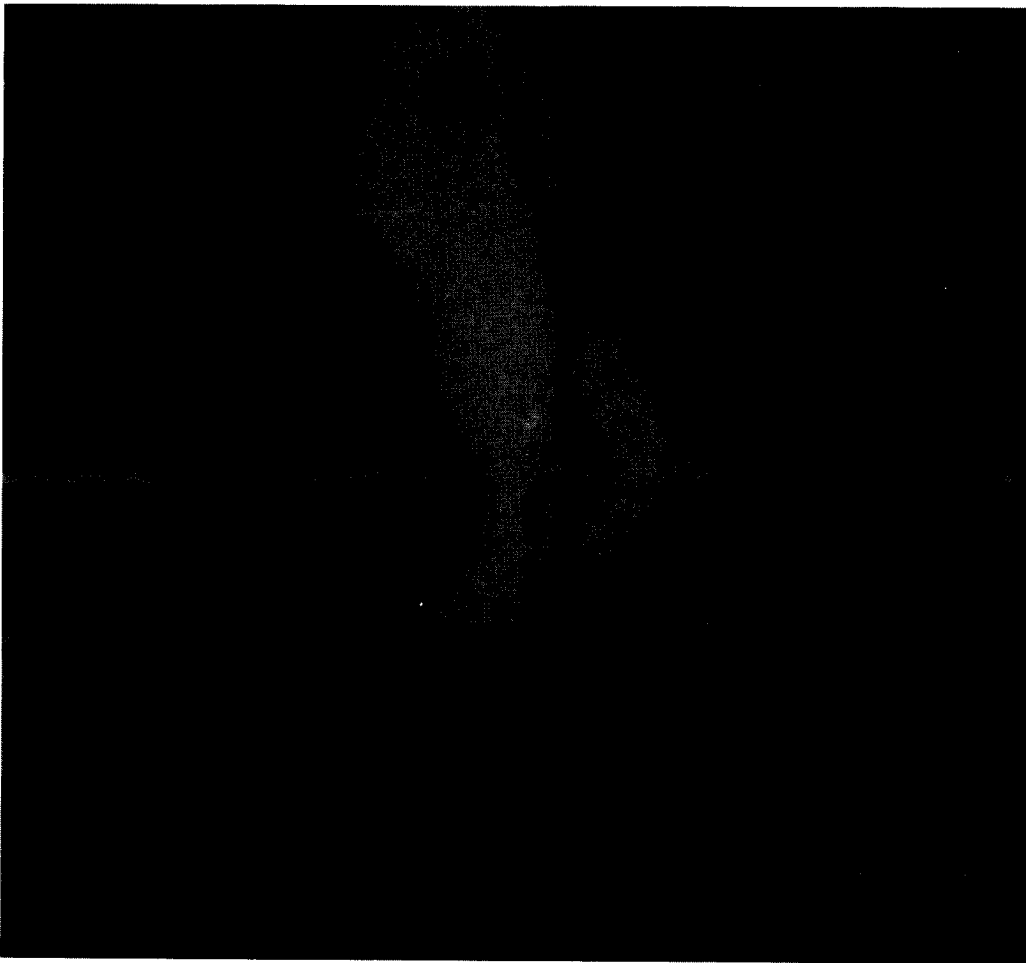


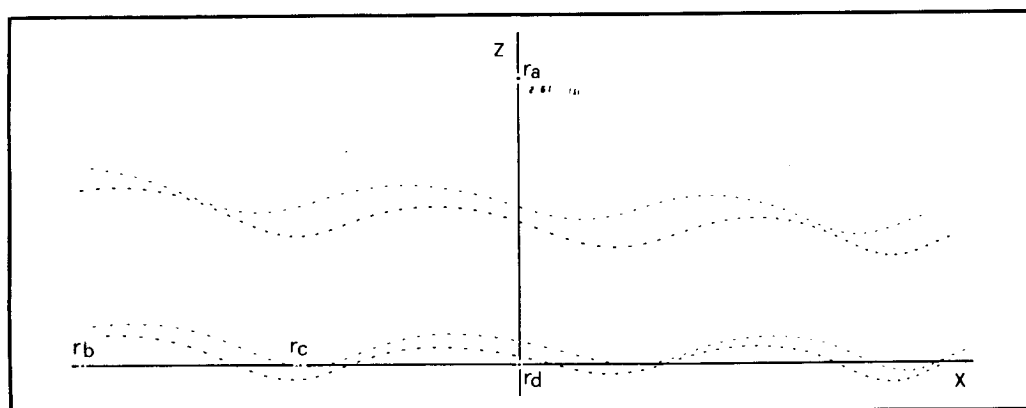
Fig. 9 - Soggetto indossante contrassegni passivi in corrispondenza alle articolazioni degli arti inferiori. La croce su di essi disegnata facilita la lettura delle loro coordinate immagine in sede di riduzione manuale dei dati.

soluzione di questo problema, sostituendo la cinecamera con la fotocamera. L'otturatore viene tenuto aperto per tutta la durata del movimento sotto studio, cosicché un solo fotogramma per macchina fotografica viene a contenere tutta l'informazione necessaria, riguardo a quel piano immagine. Naturalmente, perché tale procedura sia utilizzabile occorre tenere l'ambiente di misura a bassa illuminazione, e fare in modo che i contrassegni siano punti in grado di emettere luce solo in determinati istanti, così da lasciare sulle lastre fotografiche delle linee non continue, ma punteggiate. Ogni singolo punto sarà relativo ad un certo contrassegno, e ad un istante esattamente conosciuto. Se lo stesso contrassegno appare anche su un'altra foto, i relativi punti saranno sincronizzati con i primi. In un tipico apparato sperimentale di questo tipo, in uso presso l'Istituto di Fisiologia Umana dell'Università "La Sapienza" di Roma, i contrassegni sono diodi luminosi (LEDs), alimentati da una apposita circuiteria. Essi sono accesi da impulsi di comando radiotrasmessi da una centralina esterna, e ricevuti da un radoricevitore. Il tutto è indossato dal soggetto sotto studio. La frequenza di accensione dei LEDs, che viene a coincidere con la frequenza di campionamento del sistema complessivo, va dai 30 ai 150 Hz, a seconda del tipo e rapidità dei movimenti misurati. In definitiva, si otterranno per ogni foto dei tracciati simili a quelli di

Fig. 10. In Fig. 11 si vede una lastra cronofotografica stampata ed ingrandita, allocata sul piano di un digitizer collegato ad un computer. Ciò permette una rapida, anche se manuale, lettura delle coordinate immagini.

Da ciò che si è detto, è chiaro che la cronofotografia paga il vantaggio della sincronizzazione con l'imposizione di un protocollo sperimentale molto più impegnativo e vincolante di quello relativo alla cinematografia in quanto non si può lavorare all'aria aperta, e il soggetto è vincolato ed impacciato dai fili che alimentano i contrassegni luminosi. Inoltre, la leggibilità dei tracciati che si ottengono permane fino a quando i contrassegni si muovono con velocità sufficiente, e le relative linee rimangono distinguibili. Si consideri, ad es., la misura con cronofotografia di un movimento di salto sul posto; ogni contrassegno, nella fase di discesa, tenderà a ripercorrere le stesse posizioni assunte durante l'ascesa, rendendolo difficile od impossibile la necessaria discriminazione.

Una possibile modifica della tecnica cronofotografica è quella di fare in modo che la lastra fotografica sia trascinata a velocità costante durante l'esecuzione del movimento in misura. In tal modo, si avrà l'effetto di aggiungere una componente di movimento in senso longitudinale, così separando le traiettorie che prima tendevano a confondersi sulla lastra fotografica. Tale metodo, detto "chimofoto-



212 Fig. 10 - Rappresentazione cronofotografica di un movimento deambulatorio. Le linee punteggiate sono relative ciascuna ad un contrassegno.

grafia", fu usato per la prima volta dal fisiologo ed ergonomo russo Bernstein.

In Fig. 12 si vede una macchina fotografica commerciale, modificata per la chimofotografia mediante un motore elettrico agente sul meccanismo di trascinamento della pellicola fotografica. Il movimento di quest'ultima non crea particolari problemi in sede di calibrazione e ricostruzione. Infatti si possono allocare sul campo di misura dei LEDs fissi e sincronizzati con quelli che fuggono da contrastesegni. Pure essi lasceranno delle linee punteggiate, che permetteranno di istituire sui piani immagine gli opportuni riferimenti validi ad ogni istante di tempo.

3.7 Sistemi Optoelettronici

Come detto in precedenza gli ultimi anni hanno visto la comparsa di un sempre maggior numero di sistemi di misura del movimento che non utilizzano la fotografia, bensì principi e dispositivi optoelettronici. I gruppi ottici delle camere optoelettroniche svolgono sempre la funzione di proiettare sul piano immagine i contrastesegni. Senonché il piano sensore è ora un trasduttore atto a codificare direttamente in forma di segnale elettrico le coordinate immagini. Il vantaggio di tale sostituzione sta ovviamente nell'automazione dell'operazione di riduzione dei dati fotogrammetrici (la quale nella cinematografia e cronografia rimane sostanzialmente manuale), con conseguente netta diminuzione dei tempi coinvolti.

Il primo dispositivo optoelettronico usato nella misura del movimento è stata la televisione. In una tipica applicazione, il campo di misura sul piano immagine di una telecamera viene suddiviso in un grigliato di 1000 linee orizzontalmente e 600 verticalmente (Fig. 13). Un singolo punto avrà quindi coordinate immagini che possono variare non continuamente, ma solo in maniera discreta. In questo esempio, si dirà che la risoluzione è 1/1000 del campo di misura orizzontalmente ed 1/600 verticalmente. I sistemi televisivi in genere si avvalgono di contrastesegni "passivi", cioè non capaci di emettere luce. Essi possono essere, come nella cinematografia, dei cerchietti di colore ben contrastato, oppure di materiale riflettente o catarifrangente, che comunque la telecamera può distinguere e discriminare assai bene. Delle apposite circuiterie provvedono poi a determinare il numero di linea orizzontale e verticale di ogni contrastesegno, così dando luogo alle coordinate immagini.

Un apparato di misura disponibile sul mercato è il VICON (VIdeo CONvertor for biomechanics, prodotto e commercializzato da una ditta inglese). Esso si basa sull'uso di luce infrarossa, il che permette di lavorare in ambienti ben illuminati. Per quanto la rapidità con cui si compiono le varie operazioni sia ben superiore a quella ottenibile con i sistemi fotografici, l'uso del VICON implica una fase interattiva, mediante terminale grafico, in cui si identificano i vari contrastesegni, asse-

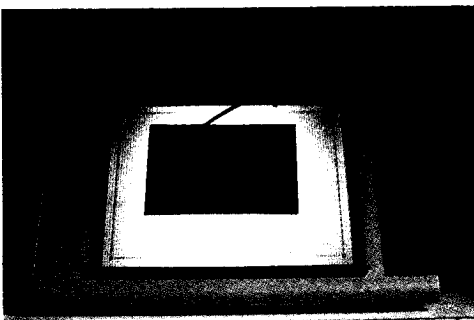


Fig. 11 - Lastra cronofotografica pronta per la lettura manuale mediante digitizer.

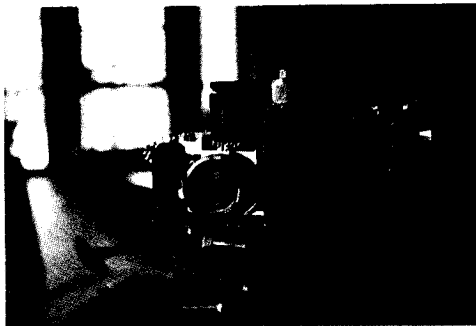


Fig. 12 - Macchina fotografica commerciale, modificata per la chimofotografia mediante motorizzazione del meccanismo di trascinamento.

gnando loro dei numeri. L'operazione è parzialmente automatizzata tramite un algoritmo di predizione ed inseguimento. In Fig. 14 si vedono due rappresentazioni di movimenti sportivi sul terminale grafico del VICON.

Egualemente basato sulla televisione è il sistema ELITE (Elaboratore di Immagini Televisive), messo a punto presso il Politecnico di Milano. Esso è caratterizzato da una particolare tecnica atta a distinguere i contrassegni da eventuali disturbi luminosi che si introducono sul campo di misura. Essa consiste in un algoritmo di correlazione in grado di riconoscere i contrassegni in base alla loro forma presunta (tipicamente circolare). Tale algoritmo è applicato da un'apposita circuiteria elettronica mentre la misura è in corso. Questo metodo riduce di molto la possibilità di scambiare i disturbi per contrassegni, ma rimane il problema della loro identificazione, quando il loro numero non sia particolarmente basso. La risoluzione dichiarata è di 1/2500 del campo di misura, la frequenza di campionamento di 50 Hz.

Un tipo diverso di dispositivi, tra cui il SELSPOT (SElective Light SPOT recognition, prodotto e commercializzato da una ditta svedese), e vari altri, è quello basato su sensori alla luce quali i fotodiodi ad effetto laterale. Questi presentano una

superficie che, quando colpita da un punto luminoso, dà luogo ad una coppia di segnali elettrici proporzionali rispettivamente alle sue coordinate rispetto a due assi ortogonali posti su tale piano sensorio. Senonché, se due o più punti luminosi sono nel campo di misura di una camera, la posizione misurata sarà quella del loro baricentro. Ne consegue che i contrassegni debbono essere attivi, cioè sorgenti di luce (in genere LEDs), accese in sequenza ciclica, in modo tale che siano "presenti" una alla volta nel campo di misura. Lo svantaggio di dover usare contrassegni attivi, con il loro apparato di alimentazione elettrica, ha la sua contropartita nel fatto che il sistema "sa" quale di essi è attivo ogni volta, e l'opera di identificazione, semimanuale nel sistema televisivo, è così del tutto automatica. Il sistema nel suo complesso è però assai sensibile a sorgenti di luce spurie, alle riflessioni di luce proveniente dai contrassegni, etc.

Un dispositivo di tipo diverso è il COSTEL (COordinate Spaziali con Trasduttori Elettrici Lineari). Esso è basato su sensori optoelettronici non già più planari ma lineari. In altre parole, ogni trasduttore, (detto CCD), dispone di un segmento sensibile formato di circa 2000 elementi sensibili quasi puntiformi, così dando luogo ad una risoluzione di 1/2000

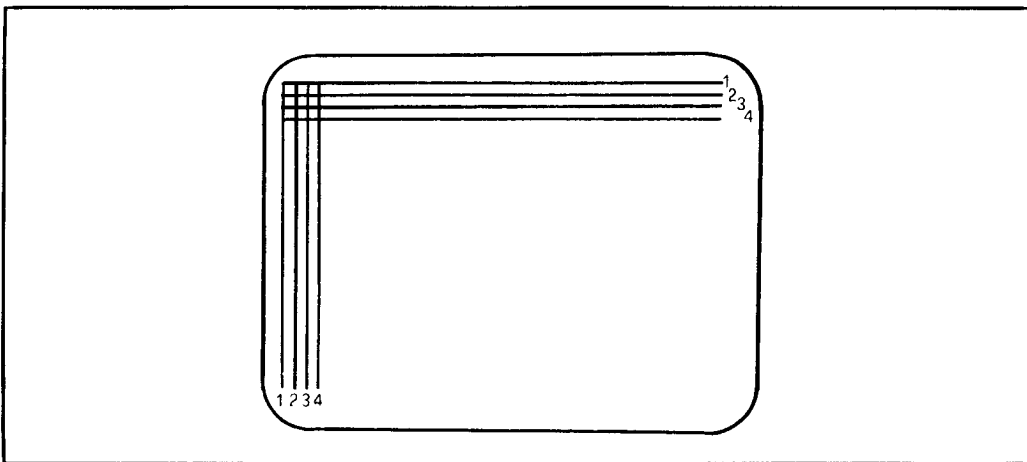


Fig. 13 - Lo spazio immagine del sensore televisivo viene diviso in righe e colonne di punti sensibili, ognuno dei quali è così dotato di un numero d'ordine che lo contraddistingue, sia orizzontalmente che verticalmente. Ogni coppia di tali numeri identifica perciò un determinato punto immagine.

del campo di misura. Per fare in modo che il raggio luminoso colpisca il CCD, esso viene diffratto da una lente bifocale in un segmento perpendicolare all'asse del sensore, che è in grado di leggere la coordinata di tale intersezione. Diversamente da quanto accade con i fotodiodi, se più punti luminosi colpiscono il sensore, essi possono essere rilevati autonomamente oppure non considerati, così conferendo al sistema una alta insensibilità ai disturbi. I contrassegni sono attivi e gestiti esattamente come nel SELSPOT. La peculiarità del COSTEL consiste nel fatto che ogni camera misura una sola coordinata immagine. Ciò fa sì che ciascuna di essa funga da sensore unidimensionale, e che tre di esse, invece di due, siano necessarie per la ricostruzione delle coordinate 3D dei contrassegni (Fig. 15).

Infine, uno dei sistemi di misura più promettenti ed innovativi è il CODA (Cartesian Optoelectronic Digital Anthropometer), prodotto da una ditta inglese, e che può essere classificato come dispositivo a scansione luminosa. Esso si basa infatti su una unità dotata di tre specchi rotanti capaci di inviare sul campo di misura tre raggi di luce bianca a forma di ventaglio; due di questi specchi ruotano attorno ad un asse verticale, il terzo orizzontale. I contrassegni sono prismi piramidali in grado di rinviare la luce esattamente lungo la direzione di provenienza. Quando un raggio ne colpisce uno, un breve impulso di luce è rinviato alla unità di scansione, ed è rilevato da fotodiodi. L'istante di detezione permette di stabilire

la posizione spaziale di un piano che contiene il contrassegno. L'intersezione dei tre piani dà luogo alle sue coordinate nello spazio oggetto. L'identificazione dei diversi contrassegni è possibile utilizzando di diverso colore. Il sistema ha, teoricamente, caratteristiche preminenti, ma la sua messa a punto si è rivelata assai critica.

Riassumendo questa panoramica sui dispositivi optoelettronici, si può dire che i sistemi televisivi hanno il vantaggio dei contrassegni passivi, ma sono a volte poco precisi ed hanno problemi di identificazione dei contrassegni. I sistemi a sensori quali i fotodiodi o CCDs risolvono quest'ultimo problema, a prezzo della praticità dei contrassegni, che debbono essere alimentati elettricamente ed eccitati con una temporizzazione abbastanza critica. Vengono riassunte in Tavola 1, in forma comparativa, le principali caratteristiche dei sistemi di misura esaminati in precedenza. Le caratteristiche prese in considerazione sono: la risoluzione spaziale, la frequenza di campionamento, il tipo di contrassegni adottato, e il loro numero massimo.

APPENDICE

La Trasformazione Lineare Diretta

Come detto in sezione 3.3.2, una maniera di utilizzare le equazioni di collinearità è di esprimerle nell'ambito di un

Tavola 1 - Caratteristiche dei principali sistemi di misura optoelettronici

	VICON	SELSPOT	COSTEL	ELITE	CODA
Risoluzione spaziale	1:600	1:4000	1:4000	1:2500	1:16000
Frequenza campionamento	50	1000/NC	200	50	600
Tipo contrassegno	rifl	LED	LED	rifl	rifl
Num. max contrassegni	30	128	20	NP	8

NP: non precisato

rifl: passivo riflettente

NC: numero di contrassegni

formalismo che si chiama Trasformazione Lineare Diretta (in inglese Direct Linear Transformation o DTL). Il vantaggio maggiore di questo metodo sta nel fatto che esso permette di eseguire semplicemente l'operazione di calibrazione, che come si ricorderà è quella in cui si calcolano i parametri fotogrammetrici interni ed esterni che definiscono, camera per camera, la configurazione geometrica del sistema di misura. In tale metodo infatti l'utente non deve misurare direttamente nessuno di essi, e nemmeno prenderli esplicitamente in considerazione. In compenso, deve essere disponibile un cosiddetto "oggetto di calibrazione", espressione con cui si intende un supporto, traliccio od altro, che porti su di esso dei contrassegni le cui coordinate 3D nello spazio oggetto siano note con sufficiente precisione.

La DTL consiste fondamentalmente nel riscrivere le equazioni di parallasse (3) in forma bilineare, e cioè come rapporto di due espressioni lineari. Eseguendo infatti tutti i prodotti nelle (3) e raggruppando i vari termini, si perviene alle seguenti espressioni:

$$x = \frac{L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1} \quad (A.1)$$

$$y = \frac{L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1}$$

Tutti gli 11 parametri $L_1 \dots L_{11}$, detti parametri bilineari della DTL, sono esprimibili in funzione dei parametri fotogrammetrici interni ed esterni. Tuttavia, come detto, tale esprimibilità non è necessaria per l'uso pratico del metodo. Infatti si consideri di avere un oggetto di calibrazione con N contrassegni P_i , ognuno di coordinate $X_i, Y_i, Z_i, i=1,2,\dots,N$. Sottoponendolo a misura con una camera, per ogni punto P_i si avrà una coppia di coordinate immagine, x_i, y_i . Si rimarca la assoluta arbitrarietà lasciata al modo in cui è istituito il sistema di riferimento nello spazio immagine. Si sostituisca ora nelle A.1 le coordi-

nate oggetto ed immagine relative al contrassegno P_i , portando tutto al nominatore:

$$(L_9 x_i - L_1) \cdot X_i + (L_{10} x_i - L_2) \cdot Y_i + (L_{11} x_i - L_3) \cdot Z_i + x_i = L_4 \quad (A.2)$$

$$(L_9 y_i - L_5) \cdot X_i + (L_{10} y_i - L_6) \cdot Y_i + (L_{11} y_i - L_7) \cdot Z_i + y_i = L_8$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

Il nostro scopo è quello di ricavare gli 11 parametri L_i , a partire da un numero di equazione che ascende a $2 \cdot N$. Ora, è chiaro che le (A.2) costituiscono un sistema lineare sovradeterminato (cioè con più equazioni che incognite, se $N \geq 6$); la linearità è dovuta al fatto che le incognite L_i compaiono alla prima potenza moltiplicate per coefficienti costanti. Come tale, esso sarà risolvibile con il metodo della pseudoinversa, che costituisce una generalizzazione del metodo di inversione di matrice comunemente applicato per sistemi lineari non sovradeterminati. Naturalmente questo procedimento dovrà essere ripetuto per due piani immagine, così ottenendo due insiemi di parametri bilineari. A questo punto la calibrazione è ultimata, è dovrà essere ripetuta solo in seguito a una qualche modifica che cambi il valore di uno o più parametri fotogrammetrici, tipicamente per spostamento accidentale delle camere. Il secondo problema relativo all'uso della DTL è quello, inverso rispetto alla calibrazione, del calcolo delle tre coordinate oggetto X_i, Y_i, Z_i a partire da quattro coordinate immagine misurate x'_i, y'_i, x''_i, y''_i , e da due serie di parametri bilineari, $L'_i, L''_i, i=1,\dots,11$. Siccome si hanno a disposizione due coppie di equazioni (A.2), in cui i parametri bilineari sono tutti noti, si avrà ancora da risolvere un sistema lineare sovradeterminato di quattro equazioni in tre incognite. In questo caso, però, non si ricorre al metodo della pseudoinversa, ma si scarta una delle equazioni, tipicamente quella relativa a y'_i o y''_i .

Per quanto riguarda i problemi pratici posti dalla DTL, si ricorda che l'oggetto di calibrazione deve essere composto di

almeno sei contrassegni. Il numero ottimale è in genere stimato non superiore ai 15-20. Nel caso che la distorsione ottica, sferica o meno, non sia trascurabile, il metodo descritto deve essere modificato per tenerne conto. Si sottolinea infine

come, nonostante gli assi coordinati da istituire sui piani immagine siano di allocazione arbitraria, la stessa convenzione debba essere applicata alle immagini che ritraggono l'oggetto di calibrazione e quelle relative alle misure vere e proprie.

Indirizzo dell'Autore

*Ing. Fabio Gazzani
Istituto di Fisiologia Umana
Laboratorio di Biomeccanica
Piazzale Aldo Moro
Roma*

Bibliografia

1. CAPPOZZO A.: Stereophotogrammetric system for kinesiological studies. *Med. and Biol Eng. and Comput.*, 21 (1981): 287-290.
2. GOSH S.K.: *Analytical Photogrammetry*. New York, Pergamon Press Ltd. (1979).
3. MARZAN T. e KARARA H.M.: A computer program for Direct Linear Trasformation of the colinearity condition and some application of it. *Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*. American Society of Photogrammetry, Falls Church (1975): 420-476.
4. WOLTRING H.J.: Calibration and measurement in 3-D monitoring of human motion. II: Experimental results and discussion. *Biotelemetry* 3 (1976): 65-97.
5. DAPENA J., HARMAN E.A. e MILLER J.A.: Three dimensional cinematography with control object of unknown shape. *J. Biomechanics*, 15 (1982): 11-19.
6. JARRET M.O., ANDREWS B.J. e PAUL J.P.: Quantitative analysis of locomotion using television. *ISPO World Congress, Montreaux, Switzerland* (1974).
7. CAPPOZZO A., LEO T., MACELLARI V.: The COSTEL kinematics monitoring system: performance and use in human movement measurements. In Matsui e Kobayashi eds., *Biomechanics VIII-A* (Champaign: Human Kinetics pub, 1982).
8. FERRIGNO G., PEDOTTI A.: ELITE: A digital dedicated hardware system for movement analysis via real-time TV signal processing. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, BME-32 (1985): 943-950.
9. LINDHOLM L.E.: An optoelectronic instrument for remote on-line movement monitoring. In Nelson e Morehouse eds. (Baltimore: University Park Press, 1974): 510-512.