

L'analisi biomeccanica fotogrammetrica come strumento di valutazione funzionale nella corsa

Domenico Di Molfetta¹
Nicola Mancini²

¹ *Responsabile nazionale di specialità lanci*

² *Docente Corso di Laurea in Scienze Motorie - Facoltà di Medicina e Chirurgia dell'Università di Foggia*

1. Introduzione

La valutazione funzionale applicata allo sport ha come finalità l'indagine delle capacità motorie di un atleta, al fine di trarre utili indicazioni per migliorare le strategie, i metodi d'allenamento. Spesso però ciò non



è sufficiente poiché è necessario spostare l'obiettivo della ricerca nella gestualità del movimento atletico; è necessario in pratica analizzare in modo obiettivo la complessità dell'azione motoria nel momento prestativo.

Uno dei compiti di un allenatore, specialista delle gare di corsa, è quello di sviluppare dei "modelli prestativi" con cui poter giudicare l'efficacia dell'esecuzione motoria del singolo atleta in modo da poter ottenere il massimo rendimento meccanico.

I modelli di valutazione della tecnica ricavabili dall'indagine biomeccanica hanno lo scopo di individuare e quantificare le variabili biocinematiche e biodinamiche che rappresentano, appunto, i fattori d'influenza della prestazione.

Lo scopo di questo lavoro è quello di studiare, attraverso l'analisi fotogrammetrica, un passo di corsa a velocità costante di un atleta praticante le specialità di fondo in atletica leggera, stimando ed evidenziando le differenze energetiche esistenti quando il corpo umano è considerato come un corpo rigido o come costituito da segmenti rigidi tra loro opportunamente articolati.

Misurando lo spostamento del C.M. body (centro di massa del corpo) in funzione del tempo ed alcuni punti rilevanti di questa struttura, si è calcolato, applicando le leggi della meccanica, la legge di moto di ciascun segmento, le forze che su di esso agiscono ed il lavoro che queste ultime compiono (Marchetti, Cappozzo, Felici e Figura).

La corsa è caratterizzata essenzialmente da una successione di contatti

del piede con il terreno generando sulla struttura muscolo-tendinea l'alternarsi di lavoro "negativo" (lavoro muscolare eccentrico) al lavoro "positivo" (lavoro muscolare concentrico).

In questo ciclo di lavoro muscolare (eccentrico-concentrico) una certa quantità d'energia cinetica è immagazzinata negli estensori della gamba durante il lavoro eccentrico sotto forma d'energia elastica, ed è restituita nella fase successiva dal lavoro concentrico (fase di spinta) sotto forma d'energia meccanica migliorando la prestazione (Cavagna e coll., 1971, 1976).

Sono state valutate le caratteristiche energetiche del lavoro e della potenza nella corsa, considerando il "modello" atleta come un sistema multi-corpo a geometria variabile. Si è cercato di formulare, attraverso criteri obiettivi, considerazioni sulle variazioni dinamiche d'alcuni parametri biomeccanici nella corsa evidenziando i principali errori tecnici del gesto.

Uno dei problemi per molti allenatori, infatti, è quello di verificare se gli errori di natura tecnica percepiti durante l'esecuzione del gesto sportivo, siano effettivamente reali e privi di distorsioni visive e percettive.

Quando, osservando un gesto motorio ne vogliamo trarre una valutazione obiettiva parametrica, utilizziamo principalmente i nostri sensi che funzionano come strumenti di misura ma, diversamente dagli strumenti tecnologici, presentano un grado di precisione e riproducibilità molto "soggettivo", dipendente anche dalle contingenze fe-

nomenologiche (ambientali). D'altra parte i parametri che di volta in volta sono "percepiti" dipendono e sono influenzati da ciò che più ci preme vedere in quel momento, in quella situazione o in quel contesto, strettamente correlati con la focalizzazione dell'attenzione. Vi sono vie preferenziali di osservazione o riconoscimento dei parametri fisici del fenomeno (movimento); esse dipendono in gran misura da fattori soggettivi (esperienza motoria propria, anticipazione, simpatia, ecc.) e solo in parte da una coerente univocità tra il tipo di parametro e lo strumento di valutazione dello stesso.

In alcuni studi si è potuto dimostrare come più osservatori si differenziano in modo eclatante quando si tratti, per esempio, di valutare tempi d'appoggio, velocità lineari e altre variabili. Uno dei tanti compiti dell'analisi biomeccanica fotogrammetrica è quello di sostituire la soggettività dell'osservatore con la quantizzazione dei principali parametri osservati.

1.1 CENNI DI LETTERATURA

L'analisi della corsa ha assunto un'importanza sempre maggiore col passare del tempo. Non sono molti gli studi riguardanti il lavoro meccanico fatto dai muscoli durante esercizi naturali quali il camminare, il correre in piano. Tra gli autori che maggiormente hanno contribuito all'evoluzione della ricerca scientifica del settore, possiamo citare Fenn (1930), Cavagna, Saibene e Margaria (1964), Ralston & Lusk (1969), Cappozzo (1981) fino

ad Arcelli (1996). Ad oggi, nonostante gli sforzi, non si è ancora riuscito a definire una relazione ben precisa tra il lavoro meccanico e la velocità della corsa. Storicamente il primo autore ad utilizzare il metodo cinematografico è stato Fenn nel 1930. Dalle riprese effettuate egli è riuscito a misurare il lavoro necessario per muovere gli arti del corpo durante la corsa ad alte velocità di percorrenza. Il risultato più importante scaturito dalla ricerca di Fenn è stato il fenomeno del recupero d'energia elastica immagazzinata nei muscoli durante la corsa. In seguito, partendo da questi studi, Cavagna e Franzetti hanno calcolato il lavoro effettuato dai muscoli come somma del lavoro svolto per innalzare ed accelerare il C.G. del corpo (lavoro esterno) e di quello per accelerare gli arti attorno al C.G. del corpo (lavoro interno). Inoltre, sulla scia delle ricerche effettuate in precedenza, Marchetti, Cappozzo, Felici e Figura hanno calcolato il lavoro meccanico sommando le variazioni cinetiche dell'energia rotazionale e lineare alle variazioni d'energia potenziale per ogni segmento corporeo (Joule).

2. Materiali e metodi

Il soggetto preso in esame è un atleta R. P. di livello regionale, praticante le discipline di corsa prolungata, che in occasione del seguente studio presentava le seguenti caratteristiche:

- età: 19 anni;
- statura: 1,77 m;
- peso corporeo: 69 Kg;

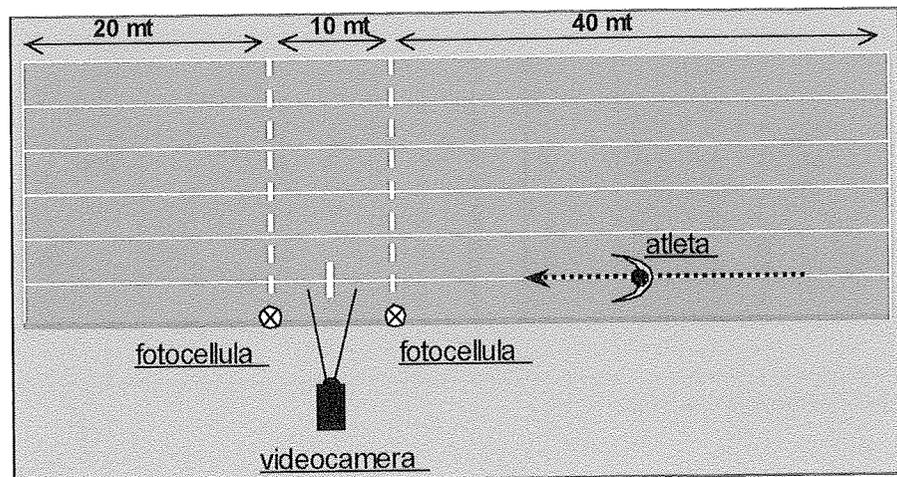


Fig. 1 - Rettilineo di pista.

- personale sui 3000: 8'51".
Il luogo prescelto per eseguire le riprese cinematografiche è stato la pista in materiale sintetico del Campo Scuola d'Atletica Leggera di Foggia. L'atleta doveva correre un tratto di rettilineo ad una velocità media di 20 Km/h, in modo tale da essere sottoposto a ripresa cinematografica. Il soggetto aveva a disposizione un rettilineo di pista lungo 70 mt di cui circa 40 mt per accelerare, 10 mt per mantenere la velocità di corsa interessata e 20 mt per decelerare (fig. 1).

2.1. STRUMENTI UTILIZZATI PER LA RILEVAZIONE

Le riprese sono state eseguite con una videocamera SONY Recorder Hi 8 CCD-V600E (frequenza di ripresa pari a 50.0 fields/s), posta orizzontalmente ed ortogonalmente a 10 mt di distanza dalla linea esterna della prima corsia della pista e con l'asse ottico ad un'altezza dal terreno di 110 cm.

La velocità media del tratto di 10 mt è stata misurata per mezzo di due cellule fotoelettriche Digitech S30 poste all'inizio e alla fine del tratto considerato e collegate ad un cronometro digitale centesimale Hanhart Magma. Al centro del tratto di 10 mt è stata individuata la zona di ripresa (lunga circa 5 mt.), utilizzando lo zoom della videocamera in modo tale da restringere il campo ottico ad una dimensione utile per riuscire a filmare almeno un passo di corsa e permettendo anche una buona definizione dell'immagine.

Della complessiva ripresa dell'atleta è stato analizzato un numero di fields che ha compreso un passo di corsa, in particolare, dal momento di stacco (perdita di contatto col terreno) del piede destro al successivo stacco del piede sinistro. Tra le numerose prove effettuate, è stata presa in considerazione quella che segnava un tempo di 1"75 nel tratto di 10 metri, corrispondente ad una velocità media di 5,71 m/s o circa 20,57 Km/h. Una seconda videocamera SONY Recorder 8 CCD-

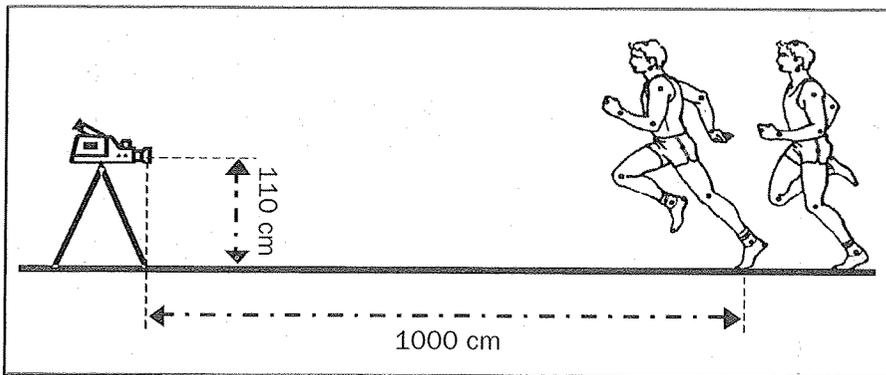


Fig. 2 - Prospetto laterale.

TR202E (frequenza di ripresa di 50.0 fields/s), è stata posta frontalmente all'atleta esattamente sulla linea di corsa. I criteri di disposizione erano gli stessi usati per la prima videocamera: asse ottico a 10 mt dal centro della zona di ripresa ed a 110 cm d'altezza dal suolo (fig. 2).

Dalle riprese effettuate da quest'ultima videocamera è stato estrapolato un fotogramma rappresentativo in cui l'atleta era esattamente al centro della zona di ripresa. Tale fotogramma è servito a calcolare la superficie maestra, importante ai fini del calcolo per il coefficiente d'attrito.

Prima e dopo le riprese dell'atleta, è stato inquadrato e filmato l'oggetto di controllo in alluminio a forma di "T" rovesciata, (dimensioni 1 mt in altezza per 1 mt di larghezza), posto perpendicolarmente all'asse ottico delle videocamere e con una delle aste perfettamente verticale ad una distanza nota dal centro dell'ottica (10 mt). Tale oggetto è servito

per determinare la scala del filmato (proporzione tra le misure dell'immagine sullo schermo e quelle reali) (fig. 3).

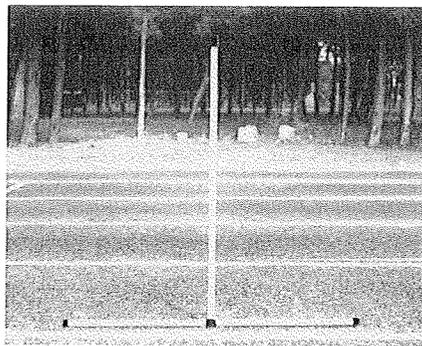


Fig. 3 - Oggetto di controllo.

2.2. ELABORAZIONE DATI

L'analisi del filmato, compiuto presso un Laboratorio di Ricerche Biomeccaniche, è stata eseguita in modo parzialmente automatizzato con le apparecchiature e nei modi qui di seguito riportati. Per primo si è provveduto a trasferire le immagini, dall'originale nastro video-8, su un nastro compatibile con il lettore videocassette Super VHS (Panasonic NV-FS 88 HQ) in uso

presso il Laboratorio e capace di "leggere" i singoli fields. Nel frattempo, è stato registrato in sovrapposizione sulle immagini stesse un contatore numerico di minuti, secondi e frames.

Il video era poi collegato ad un proiettore (Sharp LCD XG-NV 33 XE) montato su un'apparecchiatura Digitizer Numonics 2210 in grado di rilevare elettronicamente le coordinate dei punti scelti sull'immagine da un operatore. Il Digitizer è composto essenzialmente da un piano sul quale sono proiettate le immagini del proiettore, e da un mirino che consente all'operatore di indicare i punti selezionati premendo un pulsante. Le rispettive coordinate sono rilevate automaticamente, e inviate, attraverso un'interfaccia di tipo seriale RS-232 ad un computer, che provvede a memorizzarle all'interno di un file. Ogni fotogramma è stato analizzato digitalizzando 21 punti di repere significativi sul corpo del soggetto, più 2 punti fissi (uguali per tutti i fotogrammi) scelti sullo sfondo dell'immagine.

I punti di repere considerati rappresentano in genere le estremità dei segmenti del corpo dell'atleta e/o i centri articolari (fanno eccezione il Midgonion ed il 3° metacarpale):

- apice del piede;
- calcagno;
- malleolo esterno;
- ginocchio (centro articolare);
- anca (centro articolare);
- mano (3° metacarpale);
- polso (centro delle ossa del polso);
- gomito (centro articolare);
- spalla (centro articolare);

- punto sovrasternale;
- midgonion;
- vertex.

Si decideva di iniziare la digitalizzazione 3 fields prima del contatto con il terreno del piede destro e terminarla 3 fields dopo il successivo stacco del piede sinistro, perché l'algoritmo di smooting (quintic spline) non era efficacemente preciso sui primi e ultimi 3 fields.

In base alla scala del filmato (proporzione tra le misure dell'immagine sullo schermo e quelle reali) e alle suddette coordinate, il computer è stato messo in grado tramite un programma appositamente studiato, di fornire tutti i dati necessari all'analisi del gesto (distanze, angoli, velocità lineari e angolari, accelerazioni, momenti d'inerzia, ecc.) e di visualizzare un'animazione del gesto proiettato sui tre piani cartesiani del sistema tridimensionale (DRAW).

In particolare, i punti di reperi così scelti hanno determinato 14 segmenti. Per ciascun segmento, il programma individua il relativo centro di gravità (C.G. Parziale) calcolando la sua distanza da una delle due estremità del segmento stesso (De Leva, 1996). Applicando il Teorema di Varignon è stato possibile calcolare, in base alle coordinate dei baricentri parziali, le coordinate del centro di gravità generale del corpo (punto in cui si può immaginare concentrata tutta la massa delle varie parti del corpo e che è preso in considerazione per determinare la posizione, la velocità e l'accelerazione del corpo nella sua totalità).

Le velocità e le accelerazioni dei punti di reperi e quelle dei vari C.G., sono state determinate usando la prima e la seconda derivata di polinomiali di quinto grado usate per descrivere matematicamente le traiettorie dei punti stessi, i cui coefficienti sono stati determinati usando l'algoritmo quintic spline. La differenziazione teneva conto del fatto che, essendo la frequenza di ripresa in 50 fot/s, gli intervalli di tempo che intercorrono tra un field ed il successivo, è di 1/50 di secondo, ovvero 0.02 s.

Gli angoli calcolati trigonometricamente con la formula:

$$\alpha = \arctg[(y_2 - y_1) \div (x_2 - x_1)]$$

dove x_1 e y_1 sono le coordinate delle estremità di un segmento e x_2 e y_2 sono le coordinate dell'altro estremo e si riferiscono all'inclinazione d'ogni segmento rispetto all'asse verticale od orizzontale. Per differenza sono poi calcolati gli angoli tra i segmenti (angoli delle varie articolazioni). La velocità angolare è misurata in radianti/secondo ed esprime l'angolo spezzato dell'unità di tempo, ed è calcolata in base alle posizioni successive ed alle velocità dei punti di reperi. La massa dei segmenti è calcolata in rapporto alla massa del soggetto secondo le tabelle di De Leva 1996.

2.3 CALCOLO DELLA SUPERFICIE MAESTRA

La superficie maestra è la superficie definita dall'immagine di un corpo proiettata su di un piano normale nella direzione del suo moto, all'in-

terno di un fluido (come l'aria). Essa è determinante ai fini del calcolo dell'energia spesa per vincere la resistenza dell'aria.

Come già detto precedentemente, dalle immagini riprese dalla seconda videocamera è stato estrapolato un fotogramma rappresentativo, in cui l'atleta era esattamente al centro della zona di ripresa (figura 2). Tale fotogramma è stato proiettato su di un foglio di carta bianca e, con la matita, è stato disegnato il contorno del corpo dell'atleta. In precedenza con lo stesso procedimento sono stati disegnati i punti di controllo dell'oggetto di comparazione. Lungo il perimetro d'ogni parte del corpo sono stati disegnati dei punti in modo tale che il margine destro e quello sinistro risultino equivalenti. Unendo tutti i punti opposti si è ottenuta la suddivisione dell'immagine in tanti trapezi, ciascuno dei quali composto di due triangoli.

In seguito, tutti i punti (vertici dei triangoli) sono stati digitalizzati, trasformati in coordinate e trasferiti su un foglio di calcolo (Microsoft Excel) e convertite in metri, utilizzando il fattore scala. Questo ultimo è dato dal rapporto esistente tra le misure reali (determinate dalla lunghezza nota dell'oggetto di controllo 1.0 mt) e quelle sul Digitizer (1/40 mm convertito in seguito in metri).

Dalle coordinate, con il Teorema di Pitagora, è stata calcolata la lunghezza dei segmenti di retta (lati dei triangoli: a, b e c) e d'ogni triangolo è stato calcolato il semiperimetro dalla formula:

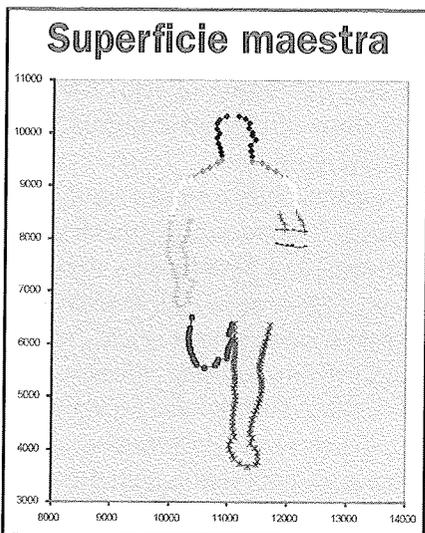
$$p/2 = \frac{a + b + c}{2}$$

tale formula è servita a determinare l'area d'ogni triangolo, con la seguente equazione:

$$Area = \sqrt{p/2 \cdot (p/2 - a)(p/2 - b)(p/2 - c)}$$

La somma di tutte le aree calcolate rappresenta la superficie maestra ed è pari a 0,48 mq.

Tale metodo di calcolo (calcolo dell'area di poligoni irregolari) introduce un errore indotto dal considerare anche i tratti curvilinei uguali a segmenti di retta, compensato dalla parcellizzazione della superficie considerata, nonché dalla presenza di tratti convessi e concavi lungo il contorno dell'immagine disegnata.



3. Risultati

I dati sono stati raccolti sotto forma di tabelle e grafici che permettono una migliore ed accurata lettura dei risultati, agevolando un'eventuale successiva comparazione. Qui di

seguito sono sinteticamente esposti i criteri e le modalità di scelta del passo di corsa analizzato:

per primo sono stati individuati gli istanti significativi legati alla fase di "stacco" piede destro, "contatto" piede sinistro e successivo "stacco". Per ogni evento è stato calcolato il corrispondente "istante tempo" di una scala di valori costruita in modo da avere dal primo all'ultimo frame tutti tempi positivi. Il tempo $t = 10.000$ s. è stato fatto coincidere all'evento "stacco" piede destro. L'intervallo di tempo tra un frame e il successivo è stato di 0.010 secondi; dalle coordinate x e y dei centri di massa dei vari segmenti e del corpo intero è stata costruita la tabella delle "posizioni dei C.M. in x e y ". Il sistema di riferimento è stato fatto coincidere con le coordinate dell'oggetto di controllo, con l'asse delle ascisse positivo verso destra e quello delle ordinate positivo verso l'alto; dalla "tabella delle posizioni dei C.M." per derivazione si è ottenuta la velocità orizzontale V_x , la velocità verticale V_y e modulo Magn dei C.M. e del corpo intero, istante per istante; analogo procedimento di derivazione ha generato la "tabella delle accelerazioni dei C.M.".

Oltre a tali dati sono stati calcolati:

- La lunghezza dei segmenti come media tra i valori fotogramma

per fotogramma, nonché la massa dei segmenti in percentuale a quella del corpo e il Momento d'Inerzia Trasversale di tutti e 14 i segmenti e del corpo intero (tabelle di Zatsiorskj, modificate da De Leva 1996);

- La velocità angolare ω d'ogni segmento, in base alla velocità degli estremi del segmento considerato, istante per istante, con l'equazione:

$$\omega = \frac{\bar{r} \cdot \bar{v}}{\bar{r}^2}$$

dove r è il vettore che va dal punto preso come centro di rotazione e l'estremità del segmento stesso e v è il vettore velocità lineare sempre allo stesso estremo.

Tutti questi dati sono serviti per calcolare la "tabella dell'energia" composta dai valori di E.C. lineare, rotazionale e totale calcolati per ogni segmento e per ogni istante, nonché del corpo intero. Sono presenti anche altre due colonne, il lavoro della forza peso $m \cdot (-g) \cdot \Delta Hy$, e il lavoro muscolare ($Mwork$) ottenuto come differenza tra il $\Delta Ec - \Delta Gwork$.

Una tale suddivisione è sembrata più utile agli scopi del presente lavoro pur essendo in parziale disaccordo con ciò che è presente in letteratura (vedi quadro riassuntivo).

Letteratura	In questo lavoro
Energia cinetica totale	Energia totale (cinetica)
Energia meccanica totale	$Mwork$ = lavoro muscolare

Nell'intero passo di corsa sono stati analizzati 37 fields a partire dal primo al tempo $t = 10.000$ s. e l'ultimo a $t = 10.370$ s.

I tre eventi, contatto, stacco, contatto sono stati così individuati:

- al tempo $t = 10.000$ s. "stacco" del piede destro;
- al tempo $t = 10.200$ s. "contatto" piede sinistro;
- al tempo $t = 10.370$ s. "stacco" piede sinistro.

La differenza di tempo tra lo stacco del piede destro ed il contatto del piede sinistro determina la "fase di volo" della durata di 0.200 s., mentre la differenza di tempo tra il contatto del piede sinistro e lo stacco del piede sinistro determina la "fase di contatto" del piede sinistro della durata di 0.170 s.

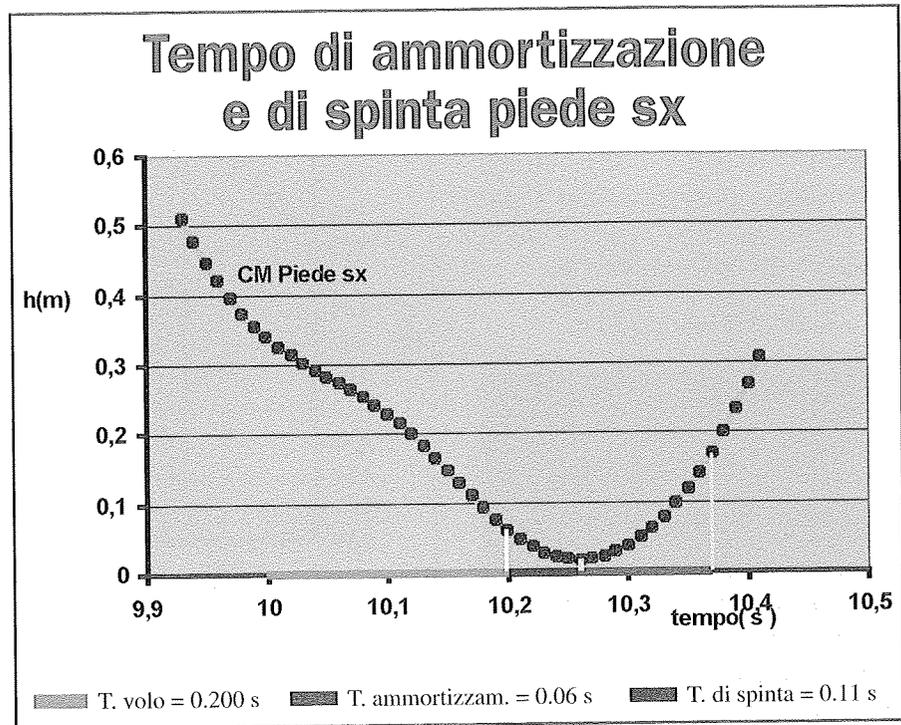


Grafico 1

Dalla "tabella delle posizioni" sono stati determinati:

- il tempo d'ammortizzazione e di spinta del piede sinistro (Grafico 1), attraverso la differenza di quota tra il valore più alto e quello più basso del C.M. piede sx sull'asse delle y in corrispondenza dei relativi istanti di tempo.
- Tempo d'ammortizzazione = 0.06 s.
- Tempo di spinta = 0.11 s

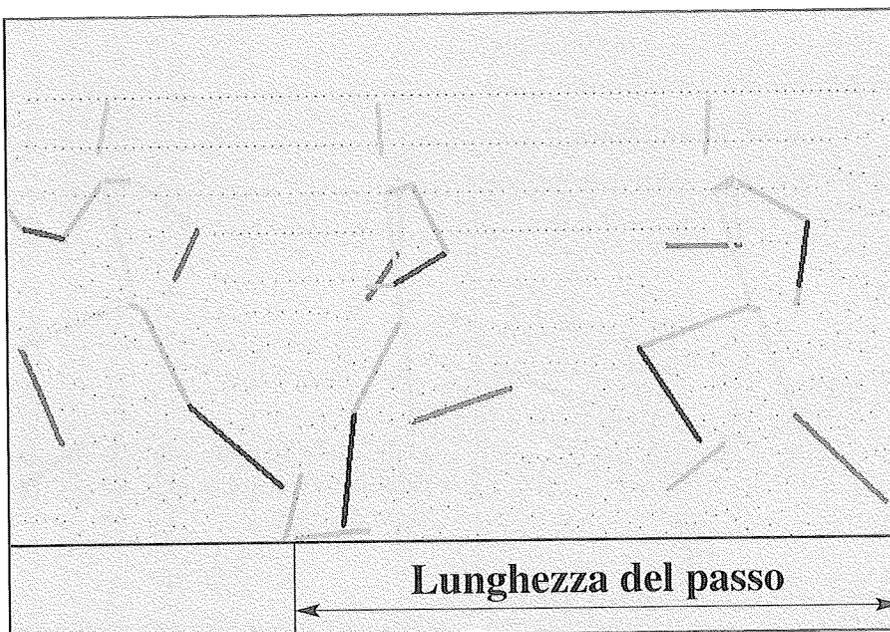


Fig. 4

lunghezza del "passo di corsa" (fig. 4), $l = 2.16$ mt, calcolato dalla differenza algebrica tra il valore della posizione del C.M. piede destro (2.157 mt) sull'asse delle x all'istante di stacco $t = 10.000$ s. ed il valore della posizione del C.M. piede sinistro (-0,004 m) nell'istante di stacco $t = 10.370$ s.;

la differenza di quota (range) tra il punto più alto della posizione del C.M. body sull'asse delle y = 1.08 m (apice della parabola di volo) al tempo t = 10.070 s. e il punto più basso della posizione del C.M. body sull'asse delle y = 0.97 m al tempo t = 10.26 s. (Grafico 2)

$$\Delta S_{yCGbody} = 0.11m$$

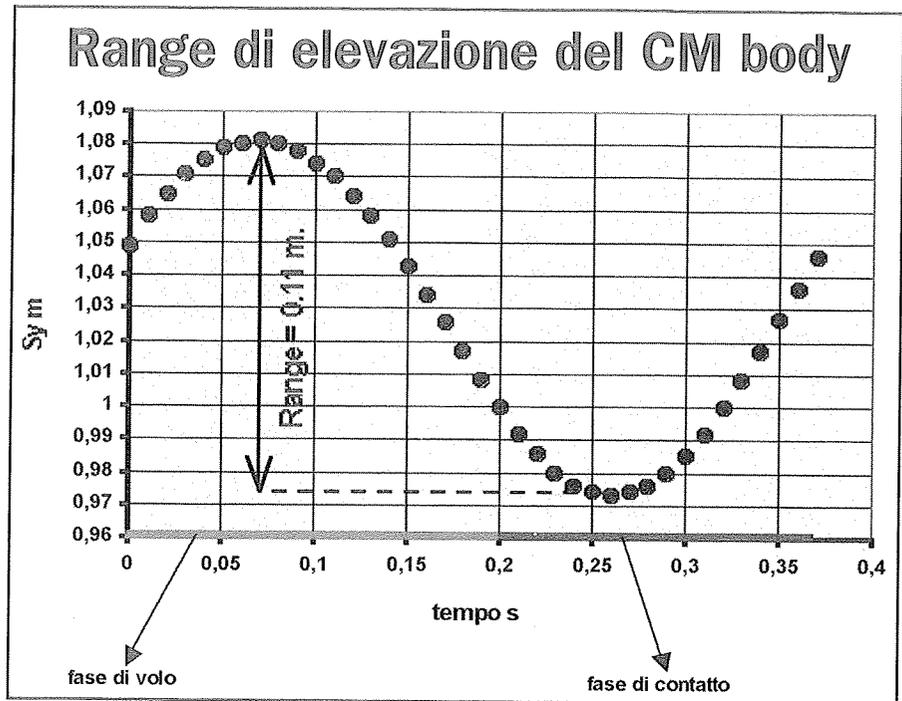
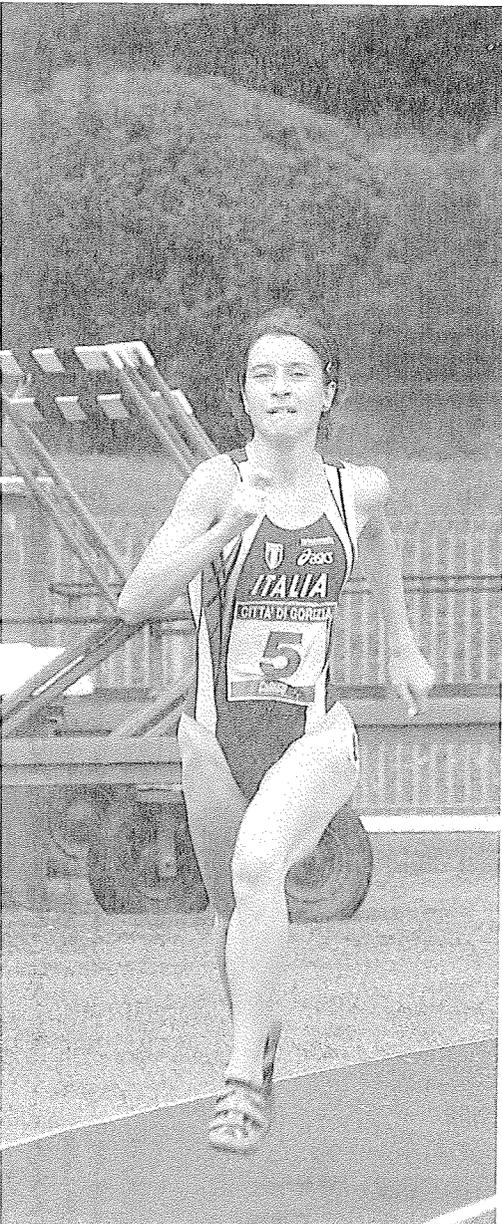


Grafico 2

spostamento orizzontale del C.M. body sull'asse delle x durante il contatto del piede sinistro al suolo (fig. 5) ottenuto dalla sottrazione algebrica tra la posizione del C.M. body sull'asse delle x (= 0.34 m) al tempo t = 10.200 s. e quella al tempo t = 10.370 s. (= -0.62 m)

$$\Delta S_{xCGbody} = 0.96m$$

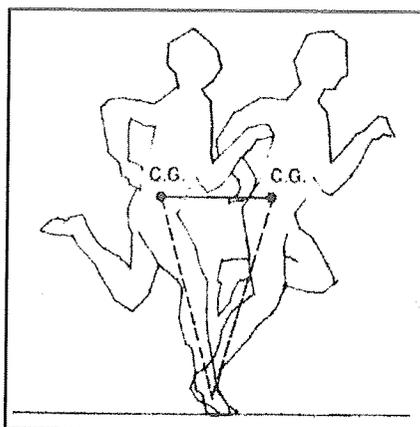


Fig. 5 (da Bosco C.; Vittori C.; Matteucci E. - 1985).

Dalle "tabelle della velocità" è stata calcolata la velocità media del C.M. body dell'atleta

$$\bar{V} = 5.84 m/s$$

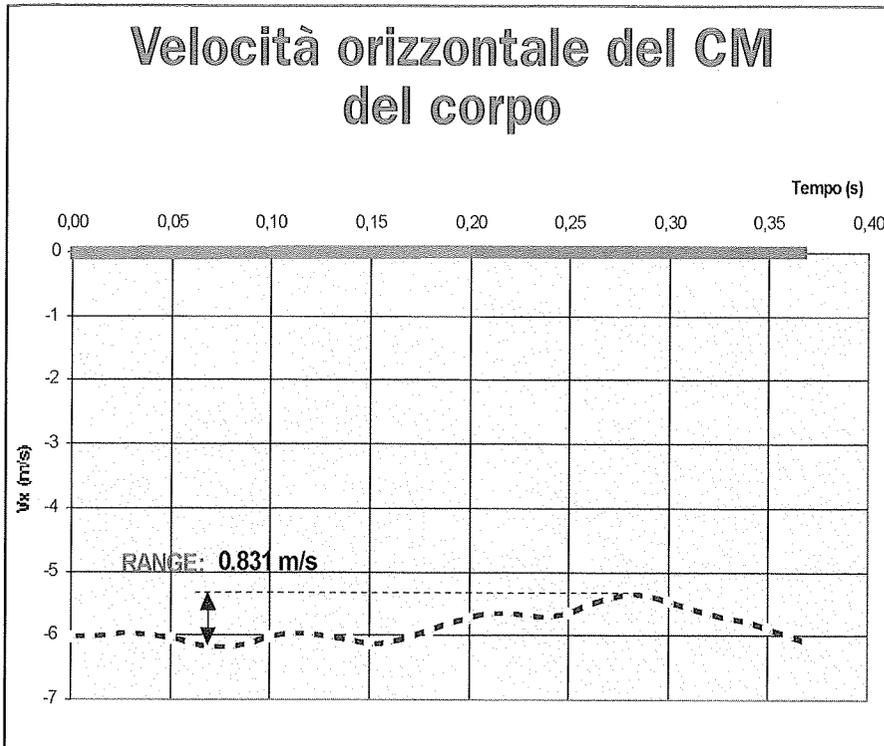
data dalla media dei valori di velocità |V| dal tempo di stacco del pie-

Tabella 1

Superficie maestra	Time	Resistenza aria	Spostamento	Lavoro aria	Ek del CM	Delta Ek	Lavoro muscoli per muovere il CM body	Tratti ascendenti della curva	Tratti ascendenti che iniziano da zero	Tratti ascendenti messi uno dietro l'altro
0.47	9.93	7.00	0.00	0.00	1006.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Coefficiente di Hill 0.056	9.94	7.48	-0.05	-0.40	1057.71	50.95	61.95	61.95	61.95	61.95
	9.95	7.96	-0.11	-0.85	1111.09	104.33	125.73	125.73	125.73	125.73
Massa soggetto (Kg) 69	9.96	8.45	-0.16	-1.38	1165.39	158.62	189.82	189.82	189.82	189.82
	9.97	8.90	-0.22	-1.96	1215.24	208.47	248.85	248.85	248.85	248.85
Posiz. iniziale (x) 1.941	9.98	9.26	-0.28	-2.58	1254.45	247.69	296.61	296.61	296.61	296.61
	9.99	9.48	-0.34	-3.20	1275.76	269.00	325.76	325.76	325.76	325.76
Ek iniziale del CM 1006.77	10	9.56	-0.40	-3.80	1279.12	272.35	336.21	336.21	336.21	336.21
	10	9.53	-0.46	-4.37	1267.80	261.04	331.17	0.00	0.00	336.21
Ek iniziale del CM 1006.77	10	9.45	-0.52	-4.90	1251.12	244.36	319.89	0.00	0.00	336.21
	10	9.40	-0.58	-5.43	1239.10	232.34	312.38	0.00	0.00	336.21
Ek iniziale del CM 1006.77	10	9.46	-0.64	-6.03	1243.24	236.48	320.17	320.17	7.79	344.01
	10.1	9.65	-0.70	-6.74	1265.29	258.53	345.03	345.03	32.65	368.87
Ek iniziale del CM 1006.77	10.1	9.90	-0.76	-7.51	1295.98	289.21	377.66	377.66	65.29	401.50
	10.1	10.07	-0.82	-8.26	1317.21	310.45	399.89	399.89	87.51	423.72
Ek iniziale del CM 1006.77	10.1	10.05	-0.88	-8.87	1315.93	309.17	398.57	0.00	0.00	423.72
	10.1	9.85	-0.94	-9.30	1291.75	284.99	373.33	0.00	0.00	423.72
Ek iniziale del CM 1006.77	10.1	9.58	-1.01	-9.63	1259.45	252.68	339.06	0.00	0.00	423.72
	10.1	9.39	-1.07	-10.00	1237.04	230.27	313.98	0.00	0.00	423.72
Ek iniziale del CM 1006.77	10.1	9.36	-1.12	-10.52	1237.04	230.27	310.79	0.00	0.00	423.72
	10.1	9.51	-1.18	-11.26	1260.28	253.52	330.44	330.44	19.65	443.38
Ek iniziale del CM 1006.77	10.1	9.74	-1.24	-12.12	1293.87	287.10	360.01	360.01	49.22	472.94
	10.1	9.89	-1.31	-12.90	1316.79	310.02	378.38	378.38	67.59	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.2	9.84	-1.37	-13.45	1312.53	305.76	369.00	0.00	0.00	491.32
	10.2	9.59	-1.43	-13.68	1281.22	274.46	332.05	0.00	0.00	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.2	9.25	-1.49	-13.75	1236.62	229.86	281.58	0.00	0.00	491.32
	10.2	8.91	-1.55	-13.77	1190.79	184.02	229.94	0.00	0.00	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.2	8.62	-1.60	-13.82	1149.00	142.24	182.64	0.00	0.00	491.32
	10.2	8.42	-1.66	-13.98	1119.73	112.96	148.43	0.00	0.00	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.2	8.40	-1.72	-14.42	1111.49	104.72	136.16	0.00	0.00	491.32
	10.2	8.50	-1.77	-15.07	1120.51	113.75	142.17	0.00	0.00	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.2	8.56	-1.83	-15.66	1124.05	117.29	143.56	0.00	0.00	491.32
	10.3	8.39	-1.89	-15.83	1098.99	92.22	116.95	0.00	0.00	491.32
Ek iniziale del CM 1006.77	10.3	8.03	-1.94	-15.60	1050.47	43.70	67.59	0.00	0.00	491.32
	10.3	7.68	-2.00	-15.34	1006.02	-0.75	23.41	0.00	0.00	491.32

Grafico 3

Al fine di confrontare il “lavoro muscolare complessivo”, ottenuto per somma dei lavori dei vari segmenti del corpo e del C.M., con il “lavoro associato al moto del C.M.” (ipotesi iniziale), si è costruita, su di un foglio di calcolo, una nuova tabella dati.



de destro al tempo di stacco del piede sinistro. Inoltre, è stato calcolato un range delle variazioni di velocità sulle x dato dalla differenza tra V_x max e V_x min.

Range $V = 6.179 - 5.348 = 0.831$ m/s (grafico 3)

Da questa tabella si otterrà un grafico nel quale le curve riguardanti i due lavori effettuati (depurate dai tratti discendenti: lavoro negativo) saranno confrontate. I tratti di curva discendenti corrispondono al lavoro negativo o energia dissipata, in parte sotto forma di calore e attriti ed in parte sotto forma di

energia assorbita dai muscoli (proprietà elastica del sistema muscolo-tendine).

Con tale studio possiamo ottenere una stima approssimativa del lavoro effettivo che i muscoli compiono. Nella tabella 1 sono presenti le seguenti serie di colonne:

- tempo
- resistenza dell'aria
- spostamento del C.M. body in x
- lavoro dell'aria
- energia cinetica del C.M. body
- Δ energia cinetica
- lavoro muscolare per muovere il C.M. body

- lavoro muscolare complessivo per muovere il C.M. body e segmenti del corpo.

La resistenza dell'aria è stata calcolata attraverso la formula di A.V. Hill (1928) modificata utilizzando i valori ottenuti dal calcolo della superficie maestra (vedi paragrafo “Calcolo della superficie maestra”)

$$R_{aria} = 0.056 \cdot V_x^2 \cdot S \cdot 9.81$$

in cui 0.056 rappresenta il coefficiente d'attrito, V_x la velocità istantanea dell'atleta espressa in m/s, S la superficie maestra calcolata pari a circa 0.48 mq ed 9.81 l'accelerazione gravitazionale. Lo spostamento del C.M body in x è ricavato dalla “tabella della posizione” sottraendo dalla colonna della posizione del C.M. body in x tutti i valori a partire dal secondo istante meno il primo.

Il lavoro dell'aria è dato dal prodotto della resistenza dell'aria per lo spostamento del C.M body in x.

L'energia cinetica del C.M. body è data dalla seguente formula:

$$E_k \text{ del C.M. body} = 1/2 \cdot m \cdot |V|^2$$

dove $|V|$ è il modulo della velocità istante per istante ed m la massa del corpo dell'atleta.

La variazione di energia cinetica (ΔE_k) del C.M. body è ricavata dalla colonna dell'Energia cinetica del C.M. body sottraendo tutti i valori a partire dal secondo istante meno il primo. Il lavoro muscolare associato al moto del C.M. body si ottiene dalla seguente formula:

$$L_{\text{muscolare}} = \Delta E_k \text{ del C.M. body} - G_w - L_{\text{aria}}$$

dove G_w è il lavoro della forza peso estrapolato dalla “tabella dell’energia”.

Il lavoro muscolare complessivo per muovere tutti i segmenti ed il C.M. body si ottiene dalla seguente formula:

$$L_{\text{muscolare complessivo}} = M_w \text{ body2} - L_{\text{aria}}$$

In cui $M_w \text{ body2}$ è il lavoro muscolare depurato dai tratti discendenti (lavoro negativo) per mezzo di un programma elaborato dal prof. Paolo De Leva.

Analogamente a quest’ultima colonna, anche quella del Lavoro associato al moto del C.M. è stata depurata dai tratti discendenti.

Vengono, per comodità, inserite 3 colonne che riportano i valori dei tratti ascendenti della curva nel seguente modo:

- tratti ascendenti della curva
- tratti ascendenti che iniziano da 0
- tratti ascendenti messi uno dietro l’altro.

Infine, per comodità si è preferito iniziare il calcolo azzerando la cur-

va all’istante $t = 10.000 \text{ s.}$, tempo corrispondente allo stacco del piede destro. Il risultato di quest’ultima operazione è evidenziato in un grafico (grafico 4) dove l’andamento delle due curve è pressoché parallelo e la curva del lavoro positivo complessivo dei muscoli risulta essere superiore a quella del lavoro positivo muscolare sul C.M.: 883.92 J rispetto a 547.64 J, ovvero il 38% in più.

4. Conclusioni

Dai dati ottenuti si evidenzia che il lavoro positivo complessivo dei muscoli è superiore, come valore, al lavoro positivo muscolare sul C.M. body, a dimostrazione di come cambia il valore del lavoro quando si considera il corpo nella sua unicità o come insieme di parti mobili articolate tra loro. Osservando l’andamento delle due curve nel grafico N° 4 si nota che durante la fase di volo (da $t = 0 \text{ s}$ a $t = 0.200 \text{ s}$) c’è lavoro.

Si tratta, dunque, del lavoro complessivo meno il lavoro della forza peso.

È lavoro muscolare in quanto dipende da azioni muscolari anche se le braccia “subiscono” in parte un po’ di energia proveniente dagli arti inferiori.

Durante la fase di volo, il lavoro positivo muscolare sul CM body dovrebbe essere assolutamente uguale a 0 J (Principio d’Inerzia), in quanto solo la forza di gravità e la resistenza dell’aria agiscono su di esso, anche se queste non sono incluse nel nostro “lavoro muscolare”.

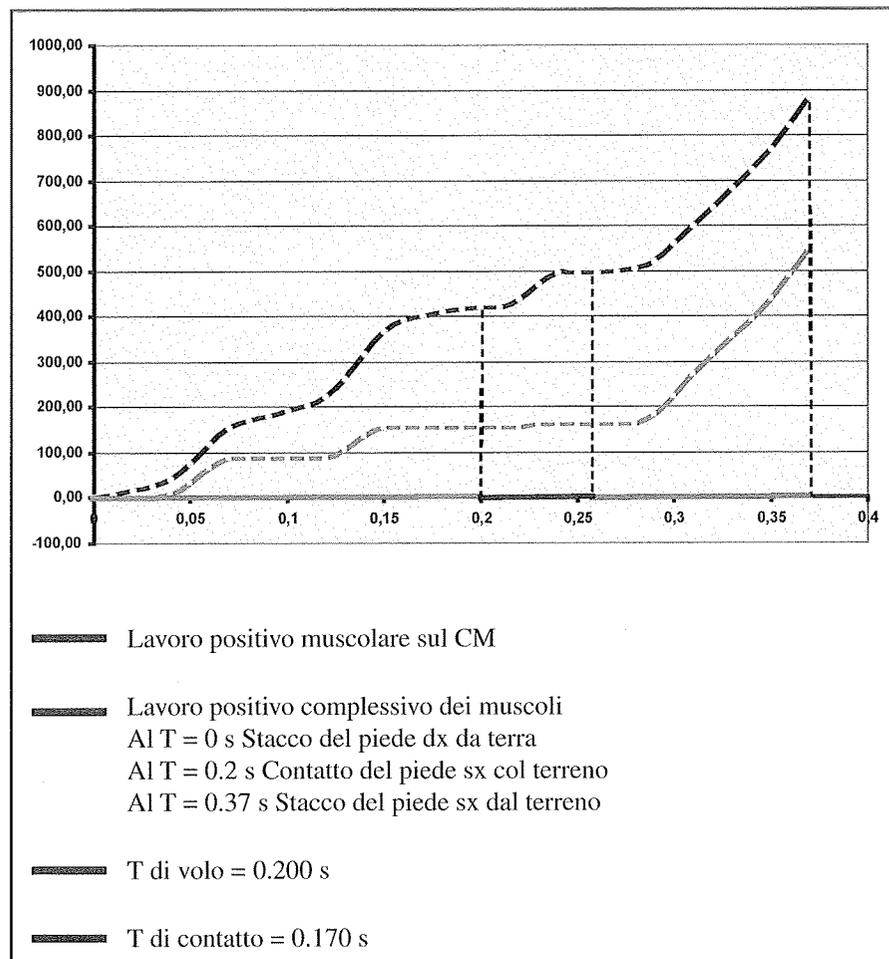


Grafico 4 - Confronto tra il Lavoro complessivo ed il Lavoro associato al moto del CM del corpo.

Tale errore (evidenziato nel grafico della velocità) è attribuito alle piccole oscillazioni di V_x rispetto al tempo. Infatti, la velocità oscilla per effetto degli errori di misurazione, comuni anche agli altri autori e quindi trascurabili. È osservabile che nella fase di volo il lavoro muscolare complessivo cresce di molto rispetto al lavoro positivo muscolare sul C.M., a dimostrazione che in volo c'è consumo di energia per accelerare i segmenti degli arti superiori e, quindi, prepararli all'atterraggio. Durante la fase di contatto e ammortizzamento del piede sinistro (da $t = 0.20$ s. a $t = 0.26$ s.) non si hanno eccessive variazioni di lavoro; infatti, osservando il grafico, la curva del lavoro positivo muscolare sul C.M. denota un andamento costante. Nella curva del lavoro positivo complessivo dei muscoli, invece, abbiamo un incremento della curva di circa 80 J corrispondente alla fase di ammortizzamento a carico del piede sinistro. Un notevole aumento del lavoro da parte di entrambe le curve, avviene pochi istanti dopo l'inizio della fase di spinta del piede sinistro a dimostrazione che l'esecuzione di un movimento attraverso un ciclo stiramento-accorciamento (SSC), ottiene come risultato un aumento della forza, della velocità, della potenza espressa durante la fase concentrica (l'aumento di questi parametri è il vero significato del concetto di restituzione di energia elastica); da quell'istante le curve viaggiano parallelamente ad indicare che non si aggiunge nessun lavoro interno sul C.M. body. Tentare di fare un confronto con la letteratura più significativa su que-

st'argomento è un compito alquanto arduo per i limiti supposti da questo studio. Si è tentato di valutare la bontà dei propri risultati confrontandoli con analoghi lavori di vari autori di fama mondiale. In particolare, rispetto a Fenn ed Elftman il nostro valore di lavoro associato al moto del C.M. del corpo 0.88 kcal/Kg/Km (a velocità 20.5 km/h) risulta essere maggiore dei valori di Fenn 0.83 Kcal/kg/km ed Elftman 0.84 kcal/kg/km entrambi calcolati a velocità media superiore (27 Km/h). La differenza è, probabilmente, da attribuire all'esecuzione errata della tecnica di corsa dell'atleta, del tipo "balzata", che causa un range di altezza del baricentro alquanto grande pari a 11 cm, (vedi grafico relativo alla posizione del CM sull'asse delle y rispetto al tempo) e che molto probabilmente compromette il rendimento meccanico della corsa. Tale esecuzione influisce negativamente anche sul passo di corsa, eccessivamente lungo, pari a 2.16 m. Inoltre l'azione balzata è causa ed effetto del successivo comportamento del piede sinistro, che presenta un tempo di ammortizzamento-spinta estremamente lungo 0.17 s (da 0.2 s a 0.37) se paragonato al tempo di volo 0.2 s (da 0 s a 0.2 s). Queste sono solo alcune delle molteplici considerazioni che possono essere studiate con questo tipo di approccio e che dimostra la bontà del sistema, e che se giustamente interpretate hanno una ricaduta sul training per tutto ciò che riguarda la scelta delle esercitazioni tecniche più efficaci per quel dato atleta.

D'altra parte diversi sarebbero stati i risultati numerici, ma non gli obiettivi, se fosse stato possibile analizzare il gesto nel corso di una gara, infatti secondo studi basati su calcoli empirici fatti da Hill A.V. l'atleta che corre in pista a 20 Km/h, in condizioni analoghe a quelle di gara, spende circa 0,95 Kcal/Kg/Km, quindi un valore 0.07 Kcal/Kg/Km superiore a quello da noi calcolato, ma ciò non toglie validità alle ipotesi iniziali.

Esistono due aspetti limitanti che riguardano questo tipo di approccio. Il primo è di tipo sostanziale: si è tentato di stimare il costo energetico considerando il corpo umano come una macchina particolare capace di trasformare energia chimica in energia meccanica e termica, ma noi sappiamo che l'energia chimica spesa è frutto di complessi processi biofisiologici; inoltre, gli attriti interni ed il riutilizzo dell'energia elastica hanno un peso considerevole di cui, ad oggi ne risulta complicata la stima.

Il secondo è di tipo pratico: l'analisi fotogrammetrica come mezzo di valutazione risulta essere estremamente complessa e con tempi relativamente lunghi rispetto alle altre tecniche di valutazione simili, ma meno precise.

Concludendo possiamo comunque affermare che tale strategia di analisi è molto importante per atleti di alto livello, che necessitano, per il miglioramento della performance, di analisi sempre più specifiche ed approfondite.

Si ringrazia per la collaborazione il Prof. Paolo De Leva dello IUSM di Roma.

Bibliografia

- Arcelli E. (1976) Spesa energetica nelle varie prove di corsa. *Atletica Leggera* n. 197, maggio.
- Bosco C., Vittori C., Matteucci E. (1985) Considerazioni sulle variazioni dinamiche di alcuni parametri biomeccanici nella corsa. *Atleticastudi*, vol. 16 (2) Marz. Apr, pp. 147-154.
- Bosco C. (1982) *Stretch-shortening cycle in skeletal muscle function*. Studies in Sport, Physical Education and Health 15, pp. 64. University of Jyvaskyla.
- Bosco C. (1985) *Elasticità muscolare e forza esplosiva nelle attività fisico sportive*. Società Stampa Sportiva. Roma.
- Bosco C. (1991) Nuove metodologie per la valutazione e la programmazione dell'allenamento sportivo. *Scuola dello Sport - Rivista di Cultura Sportiva*, 22:13-22.
- Bosco C. (1993) *Allenamento e condizionamento muscolare. Considerazioni fisiologiche sulla forza*. Società Stampa Sportiva. Roma.
- Cappozzo A., Figura F. Marchetti M. (1978) *Movements and mechanical energy changes in the upper part of the human body during Walking*. Biomechanics VI-A (Asmussen and K. Jorgensen eds), pp. 272, University Park Press Baltimore.
- Cavagna G.A., Kaneko M. (1977). Mechanical work and Efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* (London), pp. 268, 467-481.
- Cavagna G.A., Thys H., Zamboni A. (1976) The sources of External work in level walking and running. *J. Physiol.*, pp. 262, 639-657.
- De Leva P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky Selujanovs Segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29, 1223-1230.
- Luhtanen P., Komi P.V. (1978) Mechanical energy state during running. *Eur. J Appl Physiol*, 38: 41-48.
- Manoni A. (1980) Biomeccanica e divisione strutturale della ginnastica artistica, Società Stampa Sportiva, Roma.
- Margaria R. (1975) *Fisiologia muscolare e meccanica del Movimento*. Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori, Milano, pag. 32.
- Winter D.A. (1983) Moments of force and mechanical power in jogging. *J. biomech* 16: 91-97.