

Meccanica della marcia atletica

Giovanni Cavagna, Paolo Franzetti

G. Cavagna

Direttore dell'Istituto di Fisiologia Umana dell'Università di Milano, V Cattedra. Centro di studio per la fisiologia del lavoro muscolare del C.N.R. di Milano.

P. Franzetti

Istituto di Fisiologia Umana dell'Università di Milano, V Cattedra. Centro di studio per la fisiologia del lavoro muscolare del C.N.R. di Milano.

Contrariamente al moto di una ruota in cui la velocità può essere costante durante ogni ciclo, la struttura dell'apparato locomotore, come una «ruota quadrata», comporta che ad ogni passo il corpo subisca degli spostamenti verticali, e delle variazioni di velocità (Fig. 1). Questi implicano variazioni, rispettivamente, dell'energia potenziale ($E_p = m g h$) e dell'energia cinetica ($E_k = \frac{1}{2} m V^2$; dove m è la massa corporea, g l'accelerazione di gravità, h l'altezza del centro di gravità del corpo dal suolo e V la sua velocità istantanea). Poiché la velocità del centro di gravità del corpo (C_g) varia in direzione orizzontale e in direzione verticale, si hanno delle variazioni sia dell'energia cinetica dovuta al moto in direzione orizzontale ($E_{k_r} = \frac{1}{2} m V_r^2$; dove V_r è la velocità in direzione orizzontale del C_g), che dell'energia cinetica dovuta al moto in direzione verticale ($E_{k_v} = \frac{1}{2} m V_v^2$; dove V_v è la velocità in direzione verticale del C_g). Dato che V_v è inferiore a V_r , le variazioni E_{k_v} sono notevolmente inferiori a quelle di E_{k_r} . Sommando istante per istante l'energia potenziale e cinetica del C_g si ottiene l'energia meccanica totale ($E_{tot} = E_p + E_{k_v} + E_{k_r}$).

Un aumento dell'energia meccanica implica una esecuzione di lavoro meccanico positivo (W^+) e una diminuzione lavoro negativo (W^-).

Nel presente studio la meccanica della marcia atletica è stata analizzata determinando le variazioni di E_p , E_k ed E_{tot} durante il ciclo di un passo. Il lavoro necessario per sostenere gli spostamenti laterali del centro di gravità è stato trascurato in quanto esso rappresenta una piccola frazione del lavoro meccanico totale (Cavagna, Saibene e Margaria, 1963). A tal fine è stata utilizzata una piattaforma (avente una superficie di 4×0.5 m) sensibile alla forza esercitata dai piedi in direzione verticale (F_v) e orizzontale (F_r) durante la locomozione. La velocità (V_v e V_r) del C_g , il suo spostamento verticale (S_v) e le variazioni istantanee di E_p e E_k durante il passo sono state deter-

minare dai valori di F_v e F_r secondo la procedura descritta da Cavagna (1975). Dagli incrementi delle curve di E_p e E_k si ottengono:

- 1) Il lavoro positivo compiuto contro la gravità ad ogni passo:
 $W_v = \Delta E_p$.
- 2) Il lavoro positivo per accelerare in avanti ad ogni passo:
 $W_r = \Delta E_k$.
- 3) Il lavoro positivo effettivamente compiuto dai muscoli ad ogni passo per mantenere la locomozione: $W_{ext} = \Delta E_{tot}$.
- 4) Le rispettive potenze: $\dot{W}_v = W_v \cdot f$, $\dot{W}_r = W_r \cdot f$, $\dot{W}_{ext} = W_{ext} \cdot f$;
dove f è il numero di passi in un minuto.

Tutte queste grandezze venivano determinate e poste in funzione della velocità di marcia alla fine di ogni esperimento per mezzo di un micro-processore.

La durata del passo, la durata del singolo contatto di un piede col suolo e la durata del duplice contatto sono stati determinati, in varie prove, tramite contatti elettrici posti sotto le scarpe dei soggetti.

Dall'analisi dei dati ottenuti su 8 marciatori della squadra nazionale italiana, si è osservato che nella marcia atletica esistono tre differenti fasi: la prima fase è compresa tra 2 e 6-7 km/hr, la seconda tra 6-7 e 10-11 km/hr e la terza tra 10-11 e 20 km/hr. Il meccanismo delle prime due fasi è simile a quello descritto in soggetti normali (Ca-

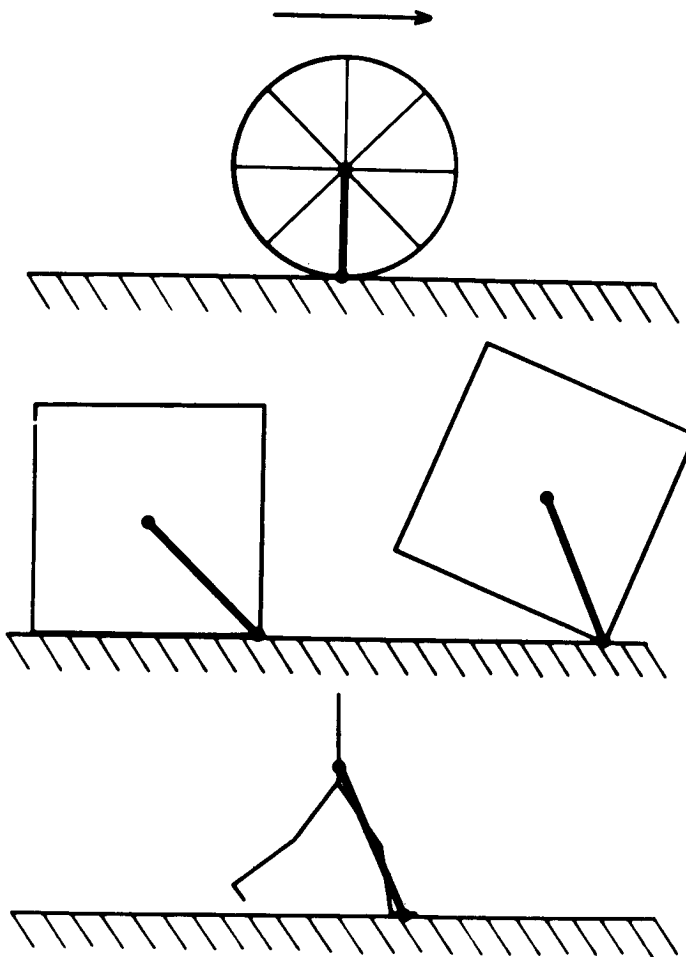


Figura 1 - La velocità del centro di gravità di una ruota può rimanere costante perché ad ogni istante il vettore velocità è perpendicolare ad una linea che unisce il Cg con il suolo. La proiezione del vettore velocità lungo questa linea è zero e non si hanno quindi variazioni di velocità. Nella marcia e nella corsa, come in una «ruota quadrata», si hanno invece variazioni di velocità e spostamenti verticali del Cg del corpo ad ogni passo. Questi sono responsabili di gran parte del lavoro meccanico necessario a mantenere la locomozione.

vagna e Margaria, 1966; Cavagna, Thys e Zamboni, 1976), mentre quello dell'ultima fase è caratteristico solo della marcia atletica.

Nella prima fase, che potremmo definire «pendolare» in quanto il Cg descrive un moto simile a quello di un pendolo rovesciato, il movimento viene mantenuto, in gran parte, grazie ad un continuo scambio tra E_p ed E_{k_f} (come in un pendolo). Infatti le curve che descrivono la variazione di E_p ed E_{k_f} del Cg durante un passo sono in opposizione di fase: ad un minimo di E_p corrisponde un massimo di E_{k_f} (durante il periodo di duplice contatto) e viceversa (durante il passaggio del Cg sulla verticale del piede). Come descritto da Cavagna et al. (1976) questo trasferimento di E_p in E_{k_f} e viceversa può essere quantizzato dalla seguente equazione:

$$\% \text{ Recupero} = \frac{|W_v| + |W_f| - W_{ext}}{|W_v| + |W_f|} \times 100 \quad (1)$$

In un pendolo senza attriti $W_{ext} = 0$ e $\% \text{ Recupero} = 100$; nella corsa $W_{ext} \approx W_v + W_f$ e quindi $\% \text{ Recupero} = 0$

W_{ext} viene fatto dai muscoli in due fasi del passo: a) per accelerare il Cg oltre la velocità raggiunta nella caduta in avanti; b) per completare il sollevamento del Cg ad ogni passo. W_{ext}/km è minimo e $\% \text{ Recupero}$ è massimo a 4-5 km/hr, vale a dire circa la velocità in cui si ha il minimo consumo di ossigeno per km (Margaria, 1938). La velocità ottimale di marcia, in cui si ha il minimo costo energetico per unità di distanza percorsa, è quindi dovuta ad un più efficiente sfruttamento del meccanismo pendolare caratteristico della marcia.

A 6-7 km/hr gli atleti raggiungono il massimo spostamento verticale del Cg ($S_v = 3,5$ cm): questo risulta essere notevolmente inferiore a quello massimo dei soggetti normali (6,5 cm a circa 8 km/hr).

A 6-7 km/hr inizia la seconda fase di marcia.

In questa fase si nota un progressivo appiattimento della curva che descrive l'andamento dell'energia potenziale posseduta dal Cg durante il passo. Questo comporta una riduzione di S_v fino ad un minimo raggiunto a 10-11 km/hr. In questo ambito di velocità si osservano spesso due sollevamenti del Cg per passo: la loro somma, tuttavia, si riduce fino a circa 1 cm a 10-11 km/hr. Questo appiattimento della traiettoria del Cg è causato dalla spinta muscolare, diretta verso l'alto e l'avanti, che mantiene sollevato il Cg durante la fase del passo in cui normalmente esso si abbassa a causa della «caduta» in avanti. Lo stesso avviene

nei soggetti normali (Cavagna e Margaria, 1966): questi, tuttavia, utilizzano il meccanismo pendolare per un ambito di velocità maggiore (fino a circa 8 km/hr).

Nella terza fase (da 10-11 a 20 km/hr) la spinta muscolare aumenta ulteriormente provocando un incremento di S_v . Oltre i 13-14 km/hr il tempo di duplice contatto è sostituito da un periodo di volo che aumenta con la velocità da 20 a 50 msec; durante tale periodo le curve E_{k_f} , $E_p + E_{k_v}$ ed E_{tot} si mantengono costanti perché non interviene nessuna forza esterna a modificare il moto del Cg, tranne la debole resistenza dell'aria che è stata trascurata nel presente studio (Fig. 2).

La Figura 2 dimostra che in questa fase di marcia le variazioni di $E_p + E_{k_v}$ e di E_{k_f} avvengono in fase come nella corsa (Cavagna et al., 1976). Questo provoca una riduzione, fino a quasi zero, del $\% \text{ Recupero}$ (eq. 1): il moto è mantenuto pressoché totalmente dal lavoro muscolare e non grazie all'utilizzazione del meccanismo pendolare, caratteristico della marcia normale.

Il lavoro meccanico positivo totale compiuto dai muscoli, W_{tot+} , è stato determinato sommando a W_{ext+} il lavoro necessario per accelerare gli arti rispetto al Cg, W_{int+} ; quest'ultimo è stato calcolato dall'equazione:

$$W_{int+} [\text{cal (kg} \cdot \text{min)}] = 0.291 \cdot V^{2.14} (\text{Km/hr}) \quad (2)$$

che descrive l'andamento medio dei dati ottenuti su soggetti normali, non atleti (Cavagna e Kaneko, 1977).

Da W_{tot+} e dai dati di consumo ($E_n \cdot \text{Exp}$) nella marcia atletica determinati da Menier e Pugh (1968), si è calcolato il rendimento del

$$\text{lavoro meccanico positivo: } R = \frac{W_{tot+}}{E_n \cdot \text{Exp}}$$

Da 2 a 9 km/hr l'andamento di R è simile a quello riscontrato nei soggetti normali (Cavagna e Kaneko, 1977), con un massimo a velocità intermedie di marcia: 6 km/hr nei normali, 8 km/hr negli atleti.

Come è noto, il rendimento della trasformazione di energia chimica in lavoro meccanico da parte dei muscoli aumenta fino a un massimo per poi diminuire con l'aumentare della velocità di contrazione muscolare (Dickinson, 1929); questo suggerisce che da 2 a 9 km/hr la trasformazione di energia chimica sia il meccanismo più importante per la produzione di lavoro meccanico nella marcia.

Oltre i 9 km/hr R aumenta quasi linearmente con la velocità. Questo andamento, caratteristico del meccanismo della corsa sia dell'uomo (Cavagna e Kaneko, 1977) che degli animali (Cavagna,

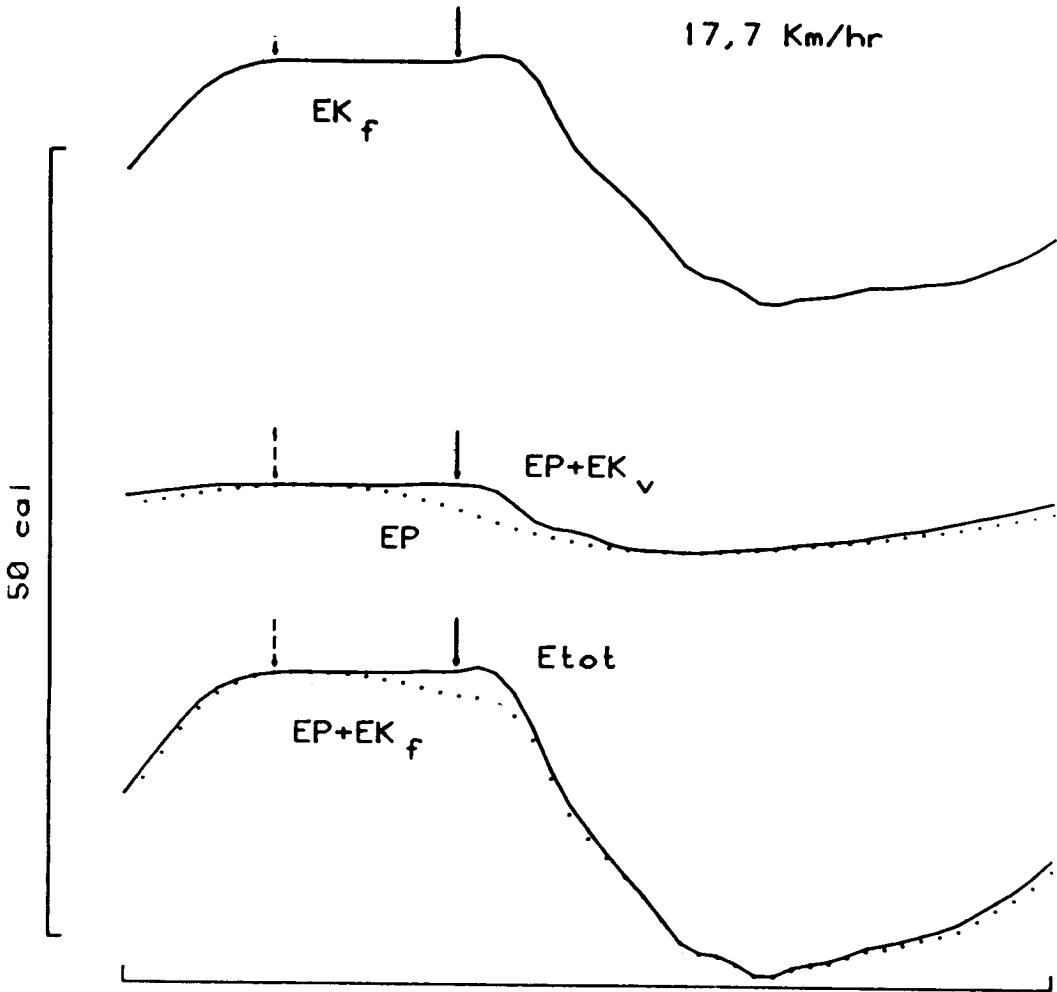


Figura 2 - Tracciato che indica le variazioni di energia meccanica durante un passo di marcia atletica alla velocità di 17,7 km/hr. La curva in alto indica le variazioni dell'energia cinetica dovuta al moto anteroposteriore del centro di gravità del corpo ($EK_f = \frac{1}{2} V^2$; dove m è la massa corporea e V_f la velocità istantanea in direzione orizzontale del centro di gravità, Cg). La curva punteggiata al centro indica l'energia potenziale ($EP = m g h$; in cui g è l'accelerazione di gravità e h l'altezza del Cg dal suolo). La curva continua al centro indica la somma $EP + EK_v$ ($EK_v = \frac{1}{2} m V_v^2$; V_v è la velocità del Cg in direzione verticale). Le curve in basso indicano l'energia meccanica totale: $E_{tot} = EK_f + EK_v + EP$ (linea continua) e la somma $EK_f + EP$ (linea punteggiata).

Le frecce indicano: il distacco del piede dal suolo (freccia tratteggiata) e il contatto del piede con il suolo (freccia continua). Lo spazio compreso tra le frecce rappresenta il periodo di volo: durante tale periodo EK_f , $EP + EK_v$ ed E_{tot} rimangono costanti.

Gli incrementi della curva E_{tot} indicano il lavoro meccanico compiuto ad ogni passo dai muscoli per mantenere il moto del centro di gravità del corpo in direzione verticale ed anteroposteriore.

Le curve sono state calcolate e tracciate per mezzo di un microprocessore a partire dai valori della forza impressa al suolo dai piedi in direzione verticale e orizzontale.

Heglund e Taylor, 1977), suggerisce che il meccanismo più importante per la produzione di lavoro meccanico positivo, sia la restituzione di energia elastica accumulata nei muscoli durante il lavoro negativo (prestiramento del muscolo con-

tratto). Infatti si è dimostrato, sul muscolo isolato, che un aumento della velocità di stiramento del muscolo contratto permette un maggior recupero del lavoro compiuto sul muscolo (Cavagna, Citterio e Jacini, 1979).

Indirizzo degli Autori

Prof. Giovanni Cavagna

Prof. Paolo Franzetti

*Istituto di Fisiologia Umana I
Cattedra V*

Università di Milano

Via Mangiagalli, 32

20133 Milano

Gli Autori desiderano ringraziare il prof. G. Boella dell'Istituto di Fisica dell'Università degli Studi di Milano per aver reso possibile l'elaborazione diretta dei dati della piattaforma; il maestro di sport T. Assi per il suo incoraggiamento e le stimolanti discussioni; e gli atleti della squadra nazionale di marcia e la federazione italiana di atletica leggera per la loro entusiastica partecipazione.

BIBLIOGRAFIA

- Cavagna, G.A. (1975) *Force platforms as ergometers*. J. Appl. Physiol., 39, 174-179.
- Cavagna, G.A., Citterio, G. & Jacini, P. (1979) *Elastic storage: role of tendons and muscles*. Comparative Physiology, in corso di stampa.
- Cavagna, G.A., Heglund, N.C. & Taylor, C.R. (1977) *Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure*. Am. J. Physiol., 233 (5), R. 243-R 261.
- Cavagna, G.A. & Margaria, R. (1966) *Mechanics of walking*. J. Appl. Physiol. 21, 271-278.
- Cavagna, G.A. & Kaneko, M. (1977) *Mechanical work and efficiency in level walking and running*. J. Physiol. (London) 268, 467-481.
- Cavagna, G.A., Saibene, F.P. & Margaria, R. (1963) *External work in walking*. J. Appl. Physiol., 18, 1-9.
- Cavagna, G.A., Thys, H. & Zamboni, A. (1976 b) *The sources of external work in level walking and running*. J. Physiol. (London) 262, 639-657.
- Dickinson, S. (1929) *The efficiency of bicycle-pedaling, as affected by speed and load*. J. Physiol. (London) 67, 242-255.
- Margaria, R. (1938) *Sulla fisiologia e specialmente sul consumo energetico della marcia e della corsa a varie velocità ed inclinazioni del terreno*. Atti Accad. Naz. Lincei, 7, 299-368.
- Menier, D.R. & Pugh, L.G.C.E. (1968) *The relation of oxygen intake and velocity of walking and running in competition walkers*. J. Physiol. (London), 197, 717-721.