

La fisiologia della locomozione

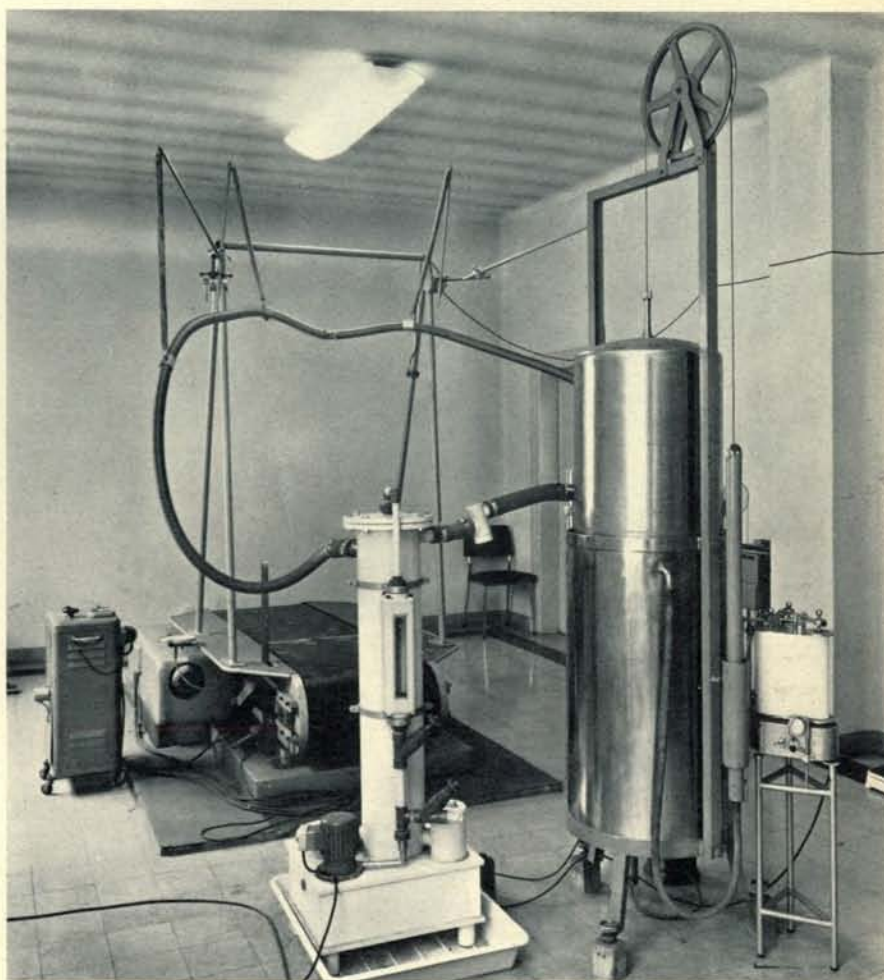
Gli studi fisiologici sul meccanismo della locomozione, che si sono sviluppati solo negli ultimi anni, trovano oggi importanti applicazioni nella ricerca spaziale, nella medicina del lavoro e in quella sportiva

di Rodolfo Margaria

Fa veramente stupire come la locomozione, l'attività forse più comune dell'uomo, una delle più importanti e più caratteristiche per ciò che riguarda la vita di relazione, abbia attirato finora così poco l'attenzione dei fisiologi da essere stata studiata con un certo impegno solo negli ultimi anni. Si pensi per esempio che, mentre è noto a tutti che la marcia e la corsa in piano richiedono un certo consumo energetico, soltanto recentemente si è scoperto come questa energia viene impiegata, dato che nella locomozione in piano a velocità costante il livello energetico medio dell'organismo non varia.

Lo studio razionale della locomozione implica anzitutto *a)* la determinazione del costo energetico necessario, e *b)* una analisi della meccanica della locomozione.

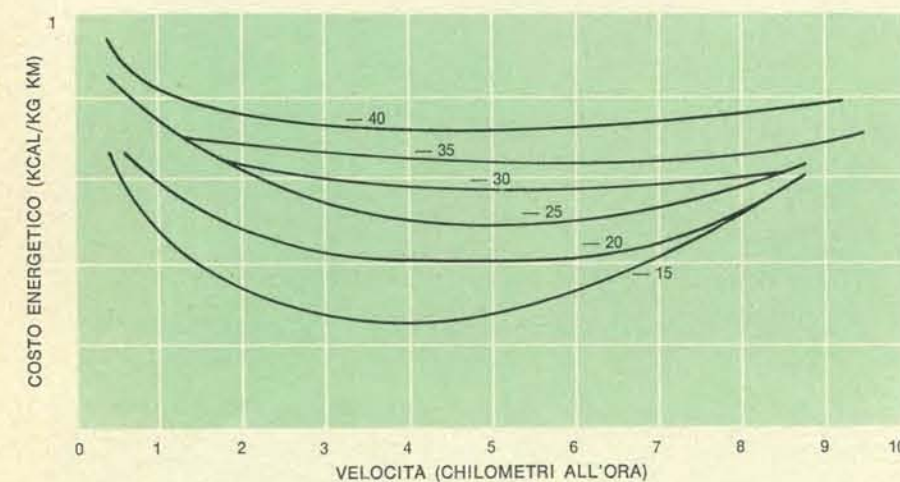
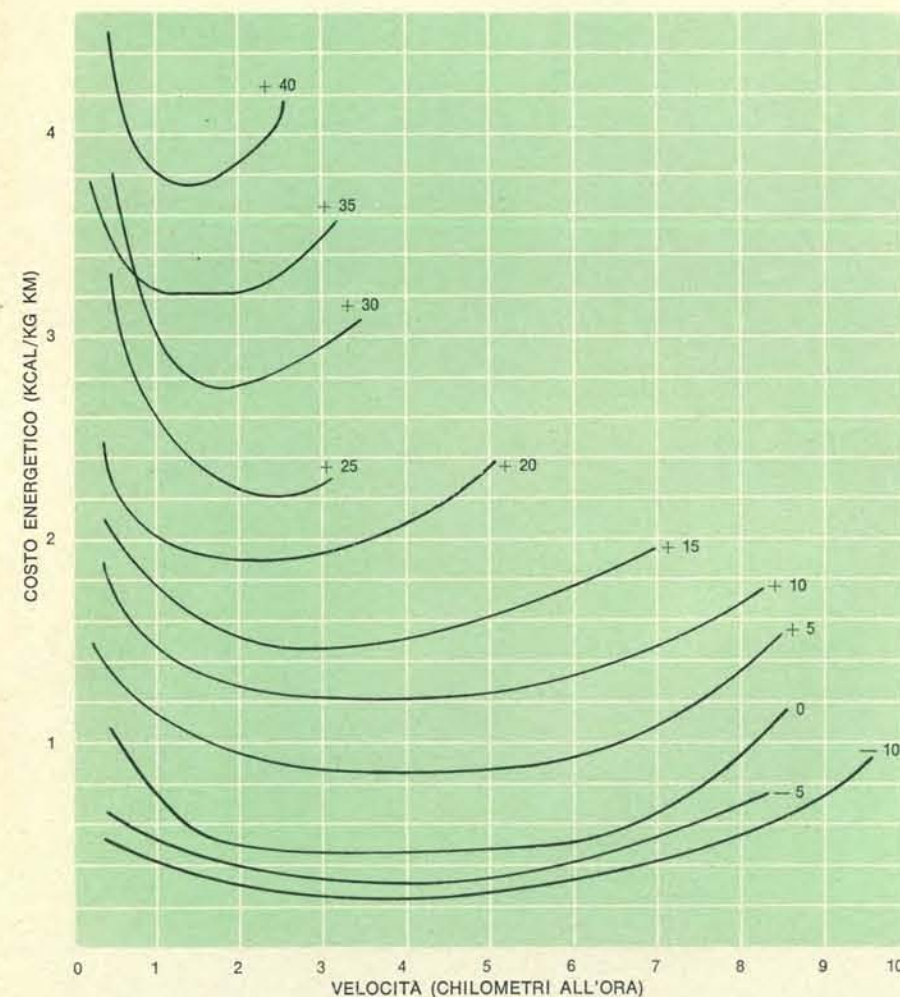
L'analisi del costo energetico della corsa può essere fatto in laboratorio servendosi di un nastro trasportatore che si muove a velocità costante e sul quale il soggetto cammina in direzione opposta al movimento del nastro e alla stessa velocità: il soggetto così rimane fermo rispetto all'ambiente, ed è facile allora raccogliere l'aria espirata, o eseguire sul soggetto tutte quelle analisi che possono essere richieste ai fini della ricerca. Poiché il soggetto in queste condizioni non ha altro contatto col mondo esterno che quello col nastro che si muove a velocità costan-



Ergometro e apparecchi registratori impiegati per lo studio della locomozione. Al centro il nastro trasportatore per lo studio in laboratorio della marcia e della corsa.

te, egli si trova nelle identiche condizioni nelle quali si trova un soggetto che cammini o corra su strada; l'unica differenza consiste nella resistenza dell'aria che, ovviamente, è nulla nel caso del soggetto che cammina su na-

stro trasportatore: questi si troverà perciò nelle identiche condizioni nelle quali si trova un individuo che cammini su strada con un vento in poppa che abbia la stessa velocità del soggetto. Valendosi di questo apparecchio è



Sottraendo dalla spesa energetica totale per chilogrammo e per ora il valore di riposo e dividendo per la velocità, si ottiene il costo energetico netto per chilometro e per chilogrammo di peso del soggetto. Questo valore, nello schema, è dato in funzione della velocità e per tutti i valori d'inclinazione del terreno, compresi entro ± 40 per cento.

facile eseguire sul soggetto durante la locomozione tutti gli esami richiesti, quale per esempio quello del consumo di ossigeno, e cioè del costo energetico dell'esercizio.

Si è potuto così osservare che il costo energetico nella marcia e nella corsa riferito a 1 chilogrammo di peso è costante nei soggetti normali. Nella illustrazione in questa pagina il costo energetico per kg di peso e per km di percorso è rappresentato in funzione della velocità di marcia, sia in salita che in discesa, per tutti i valori di inclinazione del terreno, dallo 0 al 40%. Dai dati presentati nell'illustrazione è facile calcolare il fabbisogno energetico o l'equivalente calorico di una passeggiata di qualsiasi entità quando siano noti il peso del soggetto e il percorso. Ciò che risalta con molta evidenza da questo grafico è che, fuorché nella marcia in salita a inclinazioni elevate, il costo energetico per una larga zona di valori di velocità, è pressoché indipendente da quest'ultima, e non è che alle velocità estreme che il costo aumenta. Per esempio nella marcia in piano in una zona di velocità che va da 2 a 5 km/h il costo è sempre di 0,5 kcal/kg km, e nella marcia in discesa, quando l'inclinazione del terreno è del 40%, questa zona di costo costante è ancora più estesa, perché va da 2 a 9 km/h, il costo essendo di 0,75 kcal/kg km. Il costo energetico varia invece sensibilmente quando varia l'inclinazione del terreno, e ciò particolarmente nella marcia in salita.

Questa indipendenza del costo energetico dalla velocità è ancora più evidente quando si corre. In queste condizioni le curve presentate nell'illustrazione qui accanto diventano delle rette parallele all'ascissa, almeno fino a una velocità di circa 22 km/h oltre la quale non è più possibile eseguire le determinazioni col metodo suddetto di misura del costo energetico. Nella corsa cioè il costo energetico per kg e per km è del tutto indipendente dalla velocità e può essere rappresentato in funzione della inclinazione del terreno: otteniamo allora la curva R dell'illustrazione a fronte. In questo schema sono rappresentati anche per paragone i dati riferiti alla velocità più economica. I valori raccolti su atleti (a) non differiscono apprezzabilmente da quelli raccolti su giovani studenti (n).

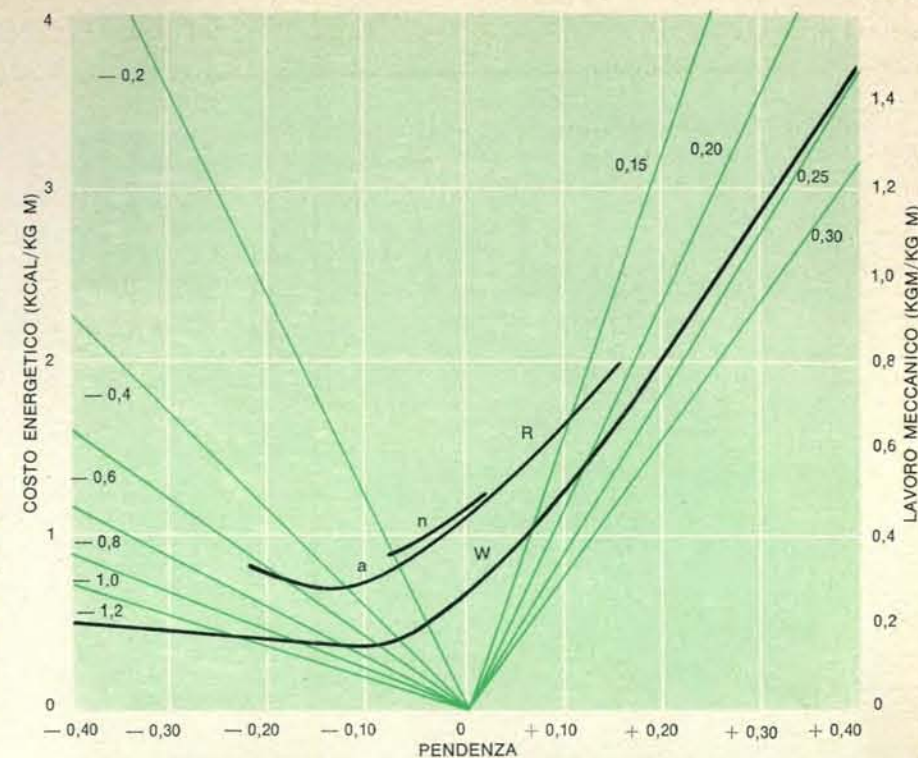
Poiché l'inclinazione del terreno esprime il rapporto tra la componente verticale dello spazio percorso rispetto alla componente orizzontale, essa è l'espressione anche del sollevamento del peso per km di percorso, cioè del lavoro meccanico, in chilogrammetri per

kg di peso. Il rapporto quindi tra i dati sull'ascissa e quelli sull'ordinata rappresenta il rendimento dell'esercizio, e questo è espresso nella figura qui accanto dalle linee «iso-rendimento» che si irradiano dallo zero. Si noti che in questo calcolo del lavoro meccanico non sono state considerate le oscillazioni verticali del corpo e le variazioni di velocità che si hanno a ogni passo: queste ultime però tendono a diventare trascurabili, rispetto al lavoro totale, a elevati valori di inclinazione del terreno. È evidente allora dallo schema che nella salita, aumentando l'inclinazione del terreno, e riducendo quindi sempre più l'importanza relativa delle oscillazioni verticali e delle oscillazioni di velocità del corpo a ogni passo, il rendimento dell'esercizio tende a un valore del 25%; il lavoro meccanico compiuto in queste condizioni viene impiegato quasi interamente a sollevare il corpo; ad aumentarne cioè la energia potenziale: i muscoli dunque compiono soltanto del lavoro « positivo » e il rendimento riscontrato deve essere considerato proprio di questo tipo di lavoro.

Nella marcia in discesa invece il muscolo compie un lavoro « negativo »: e cioè il muscolo contratto non si accorcia, ma viene allungato dal peso del corpo e dalle forze inerziali. Il muscolo in questa condizione accumula energia elastica, come una molla che venga distesa da un peso (in effetti consuma ugualmente energia, perché è sempre contratto); il muscolo consuma anche quando, contraendosi, non si può raccorciare e non esegue quindi lavoro meccanico, come si verifica per esempio quando si cerchi di sollevare un peso troppo grande. Questo rapporto tra lavoro negativo compiuto e spesa energetica, che è improprio chiamare rendimento, ammonta a -120%, e questo valore permette di calcolare il costo energetico del lavoro negativo.

Come è stato accennato precedentemente, la misura in un lungo termine di tempo dell'abbassamento o del sollevamento del corpo, come la misura della variazione della velocità non è sufficiente per misurare tutto il lavoro meccanico compiuto: infatti risulterebbe da siffatti rilievi che un individuo che cammini in piano a velocità costante non compie lavoro meccanico.

Si è reso perciò necessaria un'analisi dettagliata della meccanica della locomozione, che rendesse conto a ogni istante, e cioè nell'ambito del passo, del sollevamento del corpo e delle sue variazioni di velocità. Questo studio è



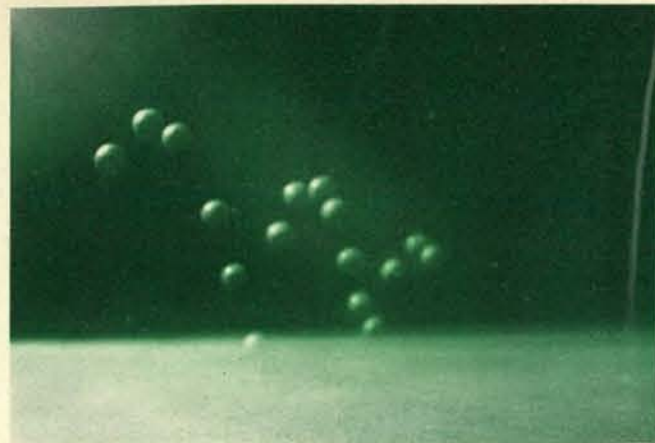
Costo energetico per chilogrammo e per metro nella marcia alla velocità più economica (W) e nella corsa (R) in funzione dell'inclinazione del terreno, calcolato in soggetti atleti (a) e non atleti (n). Considerando come lavoro meccanico soltanto il sollevamento del peso del corpo, può essere calcolato il rendimento che è indicato dalle linee di iso-rendimento, irradianti dallo zero. Il rendimento così calcolato tende a un valore di 0,25 nella marcia o nella corsa in salita, a un valore di -1,2 nella marcia in discesa.

stato intrapreso recentemente, utilizzando prevalentemente un dispositivo che era stato già usato da Fenn nel 1930 per lo studio della corsa: si tratta di una piattaforma sensibile alle componenti orizzontale e verticale della forza esercitata dal piede sul suolo. Dal grafico che così si ottiene, e che è l'espressione della accelerazione impressa al corpo nelle due direzioni, è facile passare per integrazione al grafico delle variazioni di velocità, e quindi al grafico degli spostamenti in senso verticale e in senso orizzontale rispetto a un valore medio. Gli spostamenti in direzione verticale così ottenuti, indicati con S_v nella illustrazione a pag. 16, moltiplicati per il peso, o meglio per la componente verticale della forza esercitata dal piede sul suolo, sono l'espressione del lavoro compiuto contro la gravità (W_v) mentre le variazioni di energia cinetica possono essere facilmente calcolate dalle variazioni di velocità nel senso della progressione. Non considerando altre possibili forme di trasformazione di energia la somma di $W_v + W_F$ dà le variazioni di energia totale W_{TOT} , che sono quelle indicate nello schema.

In questo salta subito all'occhio che le curve delle oscillazioni di energia potenziale e cinetica nella marcia so-

no sostanzialmente in opposizione di fase: ciò fa supporre che l'aumento dell'energia cinetica avvenga a spese della diminuzione dell'energia potenziale e viceversa. L'energia totale del corpo, appunto per questa ragione, varia molto poco, addirittura meno di ognuna delle sue componenti.

Immaginiamo un uovo che rotoli su un piano lungo il suo asse maggiore: la traiettoria del suo centro di gravità su un piano verticale sarebbe simile a quella della curva nello schema a pag. 16: anche la velocità nel senso della progressione oscillerebbe attorno a un valore medio, da un valore minimo quando il centro di gravità è più alto a un valore massimo quando il centro di gravità è più basso, e le curve del lavoro contro la gravità (W_v) e in direzione anteroposteriore (W_F) oscillerebbero corrispondentemente in perfetta opposizione di fase. La somma delle due curve, W_{TOT} , sarebbe allora semplicemente una linea orizzontale, nel caso ideale che non si perda energia negli attriti e che l'uovo non riceva energia dall'esterno. Ma se energia viene consumata negli attriti, l'energia cinetica dell'uovo, nel momento in cui il centro di gravità è nel punto più basso, non sarà più sufficiente per riportare il centro di gravità al suo



Fotografie stroboscopiche che mostrano la progressione di una palla elastica che rimbalza. Esse forniscono un modello della corsa particolarmente significativo. La spinta è infatti data dall'energia elastica accumulata dalla palla, che si è deformata nella caduta a contatto del suolo e che, come nella corsa, ha direzione

verso l'alto e verso l'avanti. Questo modello risulta aderente alla realtà in quanto anche nella corsa si ha accumulo di energia elastica nei muscoli proprio nel momento in cui il piede prende contatto con il suolo; questa energia elastica viene restituita durante la spinta in alto e in avanti che avviene nella fase successiva.

punto più alto; occorrerà allora una aggiunta di energia, che possiamo immaginare fornita da una forza perpendicolare al piano diretta verso l'alto, che compensi per le perdite; questa energia apparirebbe nella curva W_{TOT} come un sollevamento, quale quello indicato nella curva della figura a pagina 16 con a o b .

L'uovo che rotola sul piano è un ottimo modello della marcia dell'uomo (si veda l'illustrazione nella pagina a fronte): la spinta dovuta alla contrazione muscolare è nella marcia sostanzialmente diretta verso l'alto, il corpo viene sollevato e aumenta così l'energia potenziale. Questa si trasforma poi in energia cinetica nella seconda metà del passo, quando il corpo cade in avanti: questa caduta, opportunamente guidata dalle leve scheletriche, è arrestata al momento voluto dal piede che viene portato in avanti e fissato al suolo; su questo fa perno il corpo che viene sollevato nuovamente al punto di partenza a spese, in buona parte, dell'energia cinetica acquistata nella caduta.

La meccanica della corsa è sostanzialmente differente da quella della marcia. Nella corsa infatti la spinta del piede verso il suolo è tale che il corpo viene spinto contemporaneamente verso l'alto e verso l'avanti, di modo che l'energia potenziale W_V aumenta, contemporaneamente all'energia cinetica W_F , come indicato nell'illustrazione a pag. 17: le curve W_V e W_F sono cioè sostanzialmente in fase, e la somma delle due curve, W_{TOT} , che esprime le oscillazioni della energia totale del corpo, ha un'ampiezza uguale alla somma delle ampiezze delle due

curve componenti: per questa ragione non si può avere la trasformazione di una forma di energia nell'altra. Ciò spiega anche perché la marcia è molto più economica della corsa, come appare dai dati dell'illustrazione a pag. 13. Il lavoro potenziale W_V nella marcia può essere utilizzato ai fini della progressione, nella corsa invece non può essere utilizzato, il lavoro utile essendo dovuto soltanto alla componente orizzontale della spinta del piede.

Un'altra caratteristica fondamentale della corsa è che la componente verticale della forza impressa dal piede verso il suolo ha un valore pressappoco uguale al peso corporeo, ed è costante, indipendente cioè dalla velocità di progressione, mentre la componente orizzontale è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità (si veda l'illustrazione a pag. 19). Ciò sta a indicare che, a valori elevati di velocità, la direzione di questa forza si allontana sempre più dalla verticale (si vedano le illustrazioni alle pagine 18 e 19) e l'angolo da essa formato con l'orizzontale diminuisce progressivamente fino a raggiungere un valore limite di circa 45° nella corsa molto rapida, o nella corsa in accelerazione, quale quella che si ha all'inizio di una gara veloce. Un angolo minore, cioè una spinta maggiormente diretta verso l'avanti non è possibile, perché il piede slitterebbe sul suolo: è questa la ragione dell'uso delle scarpe chiodate nelle corse veloci in gara: aumenta così il coefficiente di attrito del piede contro il suolo.

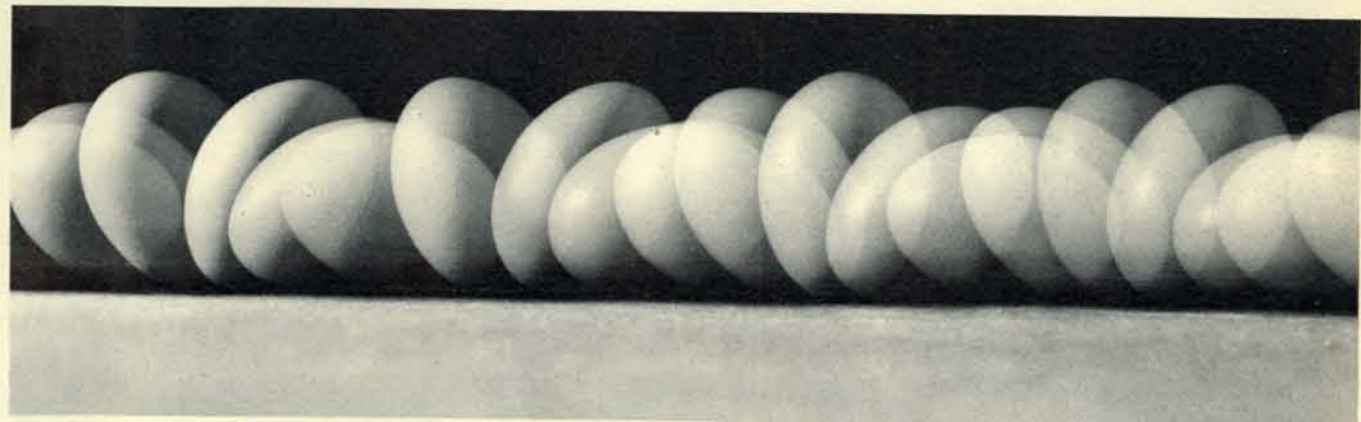
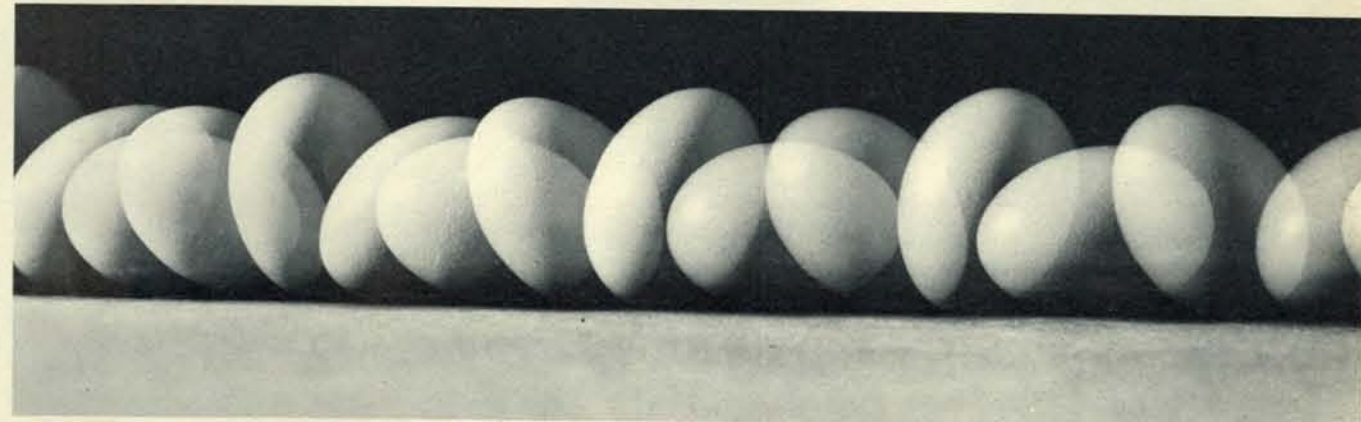
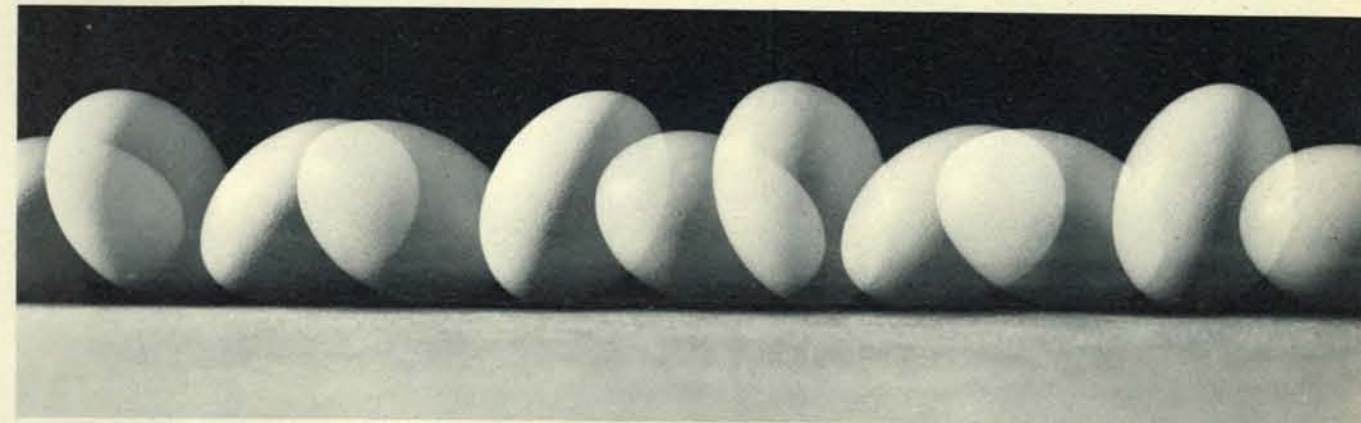
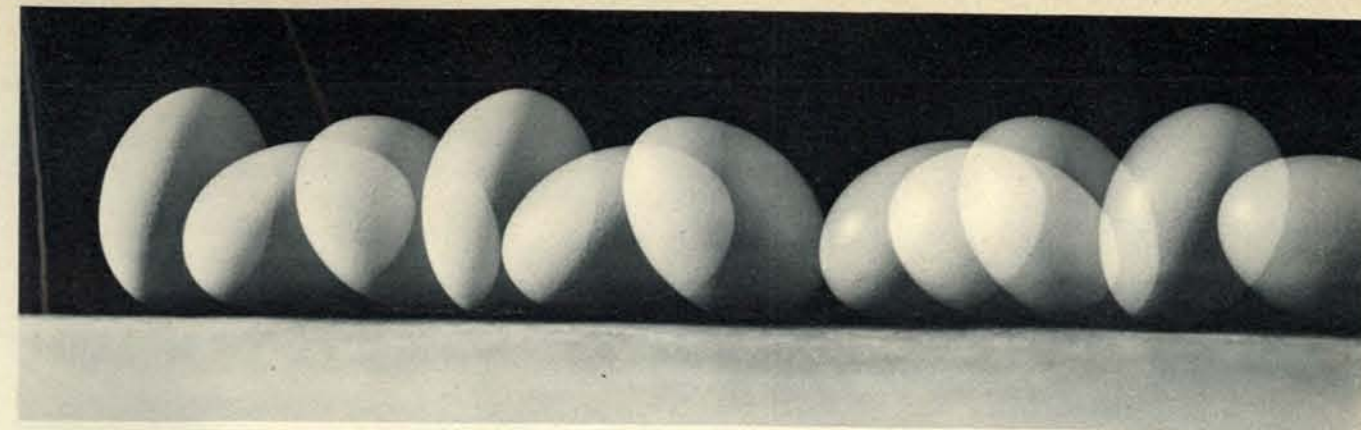
Come appare dallo schema a pag. 20 il centro di gravità del corpo non viene mai portato al di sopra del punto in cui si trova quando l'individuo è fermo in posizione eretta; l'individuo

cioè non salta, poiché ciò implicherebbe che i muscoli conferissero al corpo una accelerazione in direzione verticale superiore all'accelerazione di gravità. L'individuo che corre, cioè, rimane per un istante librato nell'aria, mentre i piedi non toccano il suolo, essendo le gambe piegate. In questo periodo l'individuo è soggetto alla forza di gravità, e il centro di gravità del corpo si sposta verso l'avanti e verso il basso: appena il piede che è stato lanciato in avanti tocca il suolo, per l'azione delle leve scheletriche, la direzione del centro di gravità si sposta verso l'avanti e l'alto. Il corpo subisce in questa condizione una certa decelerazione che si somma a quella dovuta alla resistenza dell'aria incontrata mentre l'individuo è nella fase di volo.

La spinta del corpo verso l'alto nella corsa non viene dunque utilizzata ai fini della progressione: essa è per così dire una necessità tecnica dell'esercizio, consistente nel fatto che non si può dare col piede una spinta nella sola direzione della progressione.

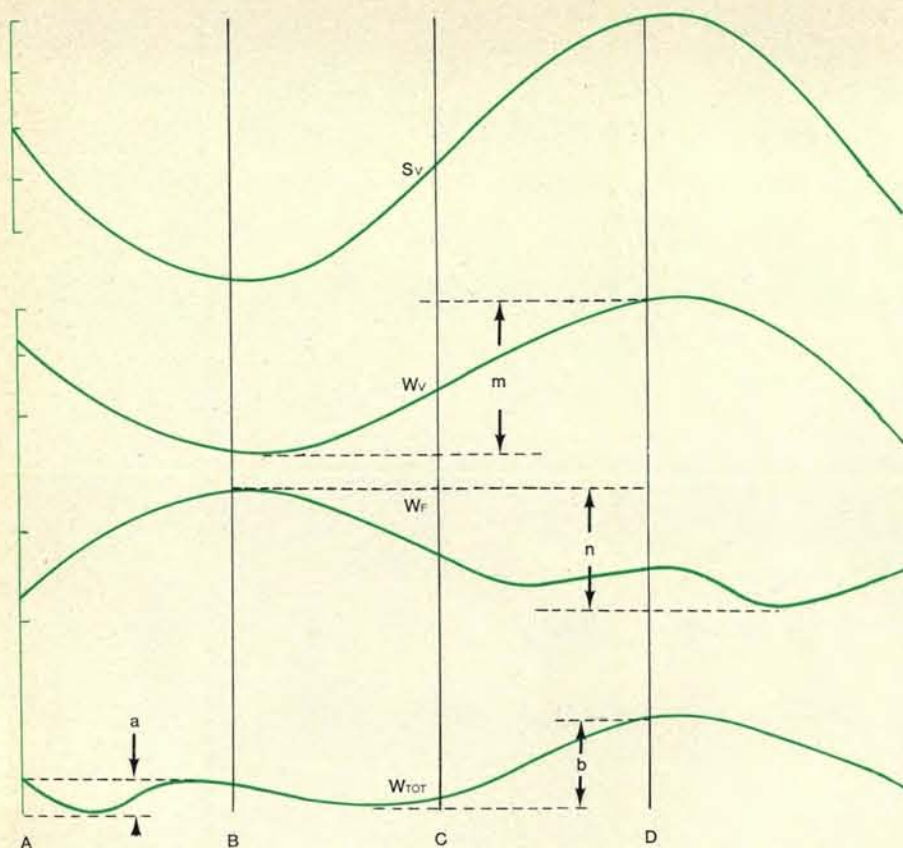
È chiaro che l'uovo che rotola su un piano non costituisce più un modello accettabile di questo esercizio: la corsa può piuttosto essere paragonata alla progressione di una palla elastica che rimbalza. In questo caso la spinta è data dalla forza elastica della palla, che si è deformata nella caduta a contatto del suolo, e che, come nella corsa, ha direzione verso l'alto e verso l'avanti.

Questo modello è tanto più aderente alla realtà in quanto anche nella corsa si ha accumulo di energia elastica nei muscoli al momento in cui il piede prende contatto con il suolo, e questa energia elastica viene restituita duran-



Fotografie stroboscopiche di un uovo che rotola su un piano lungo il suo maggiore asse. È questo un ottimo modello della marcia dell'uomo: la spinta dovuta alla contrazione muscolare è nella marcia sostanzialmente diretta verso l'alto, il corpo viene sollevato e aumenta così l'energia potenziale; questa si trasforma poi in energia cinetica nella seconda metà del passo

quando il corpo cade in avanti. La caduta, che naturalmente è opportunamente guidata dalle leve scheletriche, è arrestata al momento voluto dal piede, il quale viene portato in avanti e quindi fissato al suolo; su questo fa successivamente perno il corpo che viene sollevato di nuovo al punto di partenza a spese, in buona parte, dell'energia cinetica che ha acquistato nella caduta.



Curva dell'energia potenziale (W_v) e cinetica (W_f) del corpo per la durata di un passo, a velocità di marcia corrispondente a 4,0 km/h. W_v è calcolata dagli spostamenti verticali del centro di gravità, S_v ; W_f dalle variazioni di velocità in direzione frontale. W_{TOT} è la somma delle due curve W_v e W_f ; m è il lavoro compiuto contro la gravità, n il lavoro dovuto alle variazioni di velocità in direzione frontale; $a + b$ è il lavoro esterno totale. La scala per W è 5 cal per divisione, per S_v è invece 1 centimetro per divisione.

te la spinta in alto e in avanti. Al momento della caduta infatti i muscoli estensori, particolarmente degli arti inferiori, sono contratti (altrimenti gli arti si piegerebbero sotto il peso del corpo) e vengono forzatamente stirati, allungati, dal peso della parte soprastante del corpo e dalle forze inerziali.

L'esistenza di possibilità da parte del muscolo di accumulare energia elastica e di sfruttarla nell'esecuzione del movimento, come è stato descritto, era sempre stata controversa e anche negata dai fisiologi in passato: essa si è potuta soltanto ora mettere in evidenza con sicurezza in seguito a esatte misure del lavoro meccanico nella corsa eseguite col metodo descritto precedentemente. È importante ricordare a questo punto la distinzione tra *lavoro esterno*, lavoro che conduce a variazioni di livello o di velocità del centro di gravità e che può essere misurato col metodo descritto, e *lavoro interno*, lavoro che non conduce a spostamenti del centro di gravità e che è rappresentato sostanzialmente da contrazioni muscolari isometriche tendenti

a irrigidire strutture scheletriche o da movimenti simmetrici degli arti, tali da non condurre a spostamenti del centro di gravità del corpo, del lavoro necessario per vincere attriti interni a livello dei muscoli o delle articolazioni. Ora il lavoro esterno eseguito nella corsa a ogni passo è indicato dall'ampiezza delle oscillazioni della curva W_{TOT} della illustrazione a fronte: conoscendo la velocità media, il numero e la frequenza dei passi, è facile calcolare il lavoro compiuto per km di percorso. E poiché, come si è detto all'inizio, il costo energetico nella corsa è ben noto, essendo di rilievo facile e sicuro, il rendimento meccanico di questo esercizio può essere calcolato: il suo valore risulta essere del 45%, straordinariamente elevato, e molto superiore al valore massimo di rendimento del muscolo (25%) che si può ottenere in un esercizio che, come la marcia in salita, per la lentezza del movimento e la frequenza ottimale delle contrazioni offre meno possibilità di sprechi energetici, dovuti per esempio ad attriti interni, o a contrazioni muscolari accessorie e non utili

direttamente ai fini dell'esercizio. Nella corsa in piano il rendimento non può superare il 20,7%, trattandosi di lavoro compiuto in ugual misura, positivo e negativo. Evidentemente il dislivello della curva W_{TOT} non rappresenta il solo lavoro meccanico dovuto alle trasformazioni dell'energia chimica in energia meccanica che hanno luogo nel muscolo che si accorcia compiendo lavoro, ma anche a energia che proviene da altra fonte: questa è costituita dalla energia potenziale elastica, che origina dalla trasformazione di parte dell'energia cinetica e potenziale (gravitativa) del corpo alla fine del passo precedente, nel momento in cui il piede tocca il suolo.

Per essere completa, la descrizione dello schema citato dovrebbe includere anche la curva delle variazioni di energia elastica, W_{El} , ma questa sfugge a ogni possibilità di misura. Questa curva presenterebbe un massimo in corrispondenza dei punti più bassi delle curve W_v e W_f , e un minimo subito dopo la spinta del piede contro il suolo, quando cioè le curve W_v e W_f sono a un massimo. Soltanto allora la somma delle tre curve W_{TOT} sarebbe l'espressione del lavoro meccanico compiuto dai muscoli per il solo effetto delle trasformazioni chimiche che in essi hanno luogo nella contrazione.

Può stupire anche il fatto che l'importanza dell'energia elastica nell'esercizio muscolare non sia stata scoperta prima dai fisiologi, data la sua notevole entità; l'energia elastica utilizzata nella corsa è infatti pressoché uguale all'energia liberata dagli elementi contrattili del muscolo che si accorcia. D'altra parte il termine « elastico » ricorre molto frequentemente nella descrizione del movimento o del comportamento dell'atleta fatta dagli sportivi o dagli allenatori.

Il fatto che il costo energetico per kg di peso e per km di percorso, quale è rappresentato nello schema a pag. 13, sia una funzione rettilinea del lavoro meccanico compiuto per una larga zona di valori di inclinazione del terreno, sta a indicare, a mio avviso, che l'energia spesa nella locomozione è dovuta sostanzialmente alla produzione di lavoro meccanico, positivo e negativo, e non in misura apprezzabile ad attriti interni, quali si possono avere a livello dei muscoli che si contraggono, o delle articolazioni, o a contrazioni muscolari statiche, isometriche, o infine a movimenti simmetrici degli arti, che non conducano a uno sposta-

mento del centro di gravità. E questo è confermato anche dal fatto che, se l'energia nella marcia e nella corsa fosse spesa per vincere degli attriti, poiché l'attrito aumenta con la velocità secondo una funzione esponenziale, anche il costo energetico dovrebbe essere enormemente influenzato dalla velocità, che invece non ha, apparentemente, alcuna influenza sulla corsa, nella quale pure si raggiungono velocità considerevoli, e molto scarsa influenza ha nella marcia. Si può dunque giungere alla conclusione che nella marcia a velocità moderata e nella corsa in piano il solo fattore che ha importanza nel giustificare la spesa energetica è che il lavoro meccanico positivo compiuto a ogni passo è immediatamente seguito da altrettanto lavoro negativo che lo annulla.

Analogamente è nulla la variazione media dell'energia meccanica totale quando si sale e si scende continuamente da uno scalino: il livello energetico di un individuo in questo esercizio non varia, ma è possibile ugualmente calcolare, in questo caso più facilmente che nella marcia, tutto il lavoro meccanico positivo e il lavoro negativo compiuti. E di questo lavoro possiamo anche conoscere il rendimento meccanico globale, partendo dai dati noti di rendimento del lavoro positivo e del lavoro negativo; esso risulta essere 20,7%.

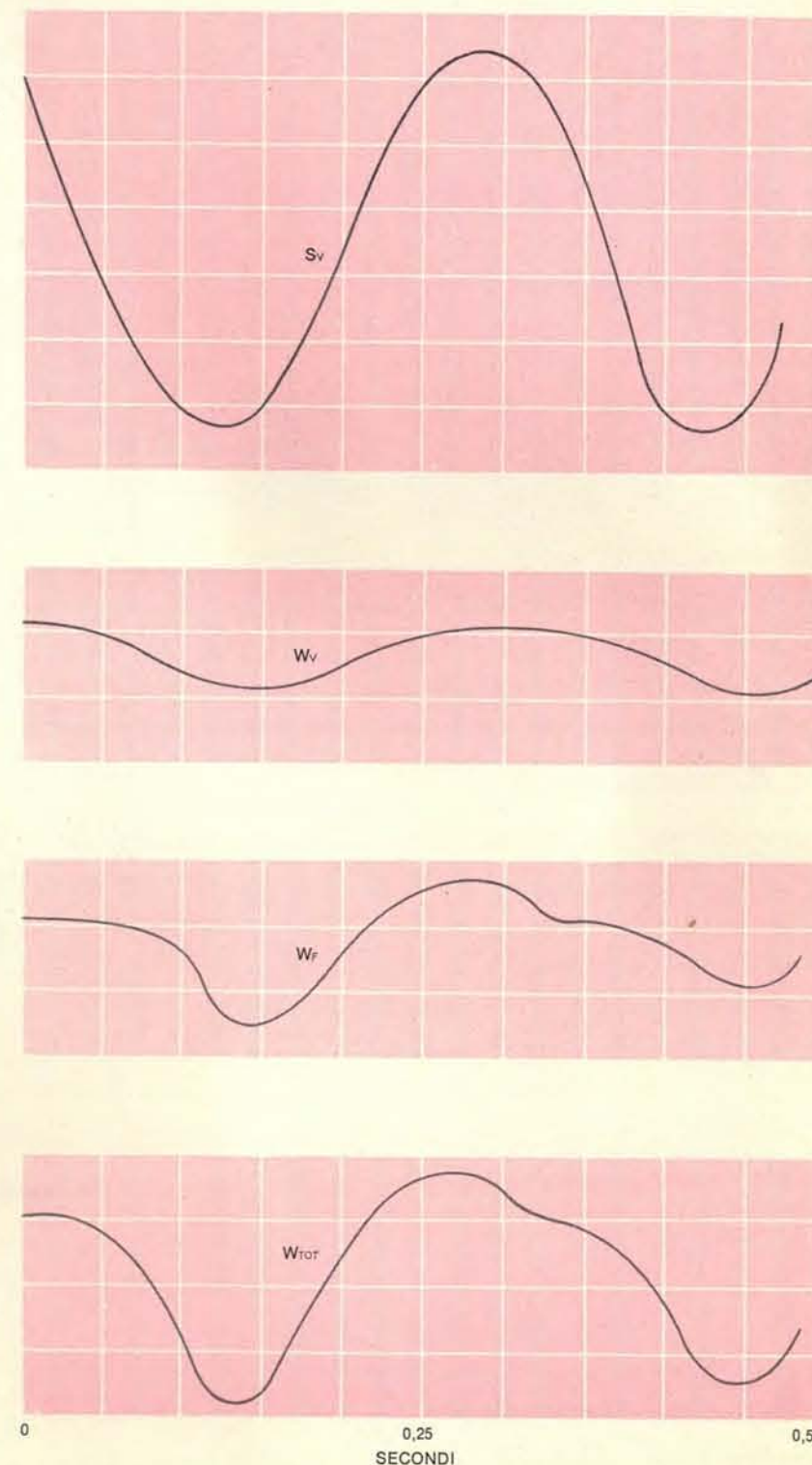
La quantità di lavoro positivo che è compensata da una uguale quantità di lavoro negativo non è utile ai fini di elevare il livello energetico del corpo, e può perciò considerarsi, sotto questo punto di vista, *sprecata*. Nella marcia e nella corsa in piano a velocità costante tutto il lavoro è *sprecato*: su terreno leggermente inclinato il livello energetico aumenta nella marcia in salita, diminuisce nella marcia in discesa, ma si ha ugualmente del lavoro *sprecato* perché le oscillazioni verticali del corpo sono superiori a quelle richieste dalla inclinazione del terreno. Soltanto quando l'inclinazione del terreno in salita supera il 20%, il sollevamento del corpo a ogni passo non è seguito da un abbassamento, né si ha una apprezzabile decelerazione del corpo: non si ha quindi più lavoro negativo. Analogamente nella marcia in discesa, a inclinazione superiore al 10%, il corpo non viene sollevato a ogni passo, né viene accelerato verso l'avanti dall'attività muscolare, e tutto il lavoro compiuto è negativo; l'accelerazione in avanti nella marcia in discesa viene sostenuta unicamente dalla gravità.

La spesa energetica richiesta per il lavoro sprecato può essere visualizza-

ta nello schema già citato a pag. 13 dalla distanza fra la curva del consumo effettivo a una certa inclinazione del terreno, e le linee di iso-rendimento indicate con 0,25 per la marcia in salita e con -1,2 per la marcia in discesa, mentre la rimanente parte, e cioè la distanza tra queste linee e l'ascissa, è l'espressione della spesa energetica

necessaria per il compimento di lavoro positivo o negativo.

Questa quantità di energia *sprecata* nella marcia e nella corsa in piano, in salita e in discesa è rappresentata nella illustrazione a pag. 20 in alto. Appare che nella marcia in piano il lavoro meccanico *sprecato* ammonta a 0,044 kgm/m kg.



Curve dello spostamento verticale del centro di gravità del corpo S_v e dell'energia potenziale W_v , cinetica W_f e totale W_{TOT} , durante un passo nella corsa a 20 km/h. In questo caso la scala per W è 10 cal per divisione, mentre quella per S_v è ancora di 1 cm.



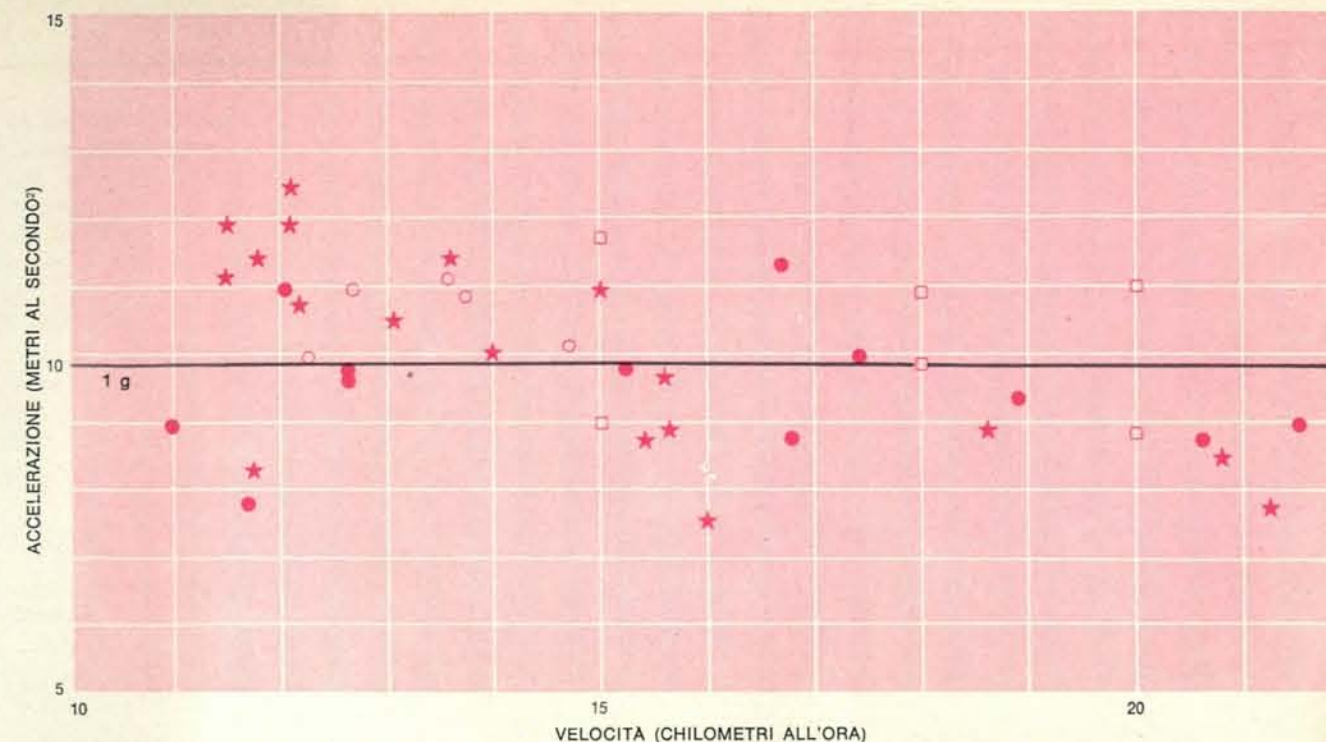
Fotografie stroboscopiche di un atleta in una corsa veloce. Nella corsa la componente verticale della forza impressa dal piede verso il suolo ha un valore pressappoco eguale al peso corporeo, ed è costante, indipendente cioè dalla velocità di progressione, mentre la componente orizzontale è tanto maggiore quanto mag-

giore è la velocità. Ciò significa che a valori elevati di velocità la direzione di questa forza si allontana sempre più dalla verticale e l'angolo da essa formato con l'orizzontale diminuisce progressivamente fino a raggiungere un valore limite di circa 45° nella corsa molto rapida, o all'inizio di una gara veloce.



Fotografia stroboscopica di una partenza di una corsa veloce. Un angolo minore, cioè una spinta maggiormente diretta verso l'avanti non è possibile perché il piede slitterebbe sul suolo.

È questa la ragione dell'uso, nelle corse veloci e in generale in quasi tutte le specialità dell'atletica leggera, delle scarpe chiodate con le quali aumenta l'attrito del piede contro il suolo.



Valori medi della componente verticale della accelerazione alla quale è sottoposto il centro di gravità a ogni passo in funzione della velocità di corsa. La linea nera è stata disegnata in corrispondenza al valore dell'accelerazione di gravità (9,81).

La componente verticale della forza impressa dal piede non varia in misura apprezzabile con la velocità di corsa. Questo fatto sta a indicare che il soggetto esercita una forza minima e quindi di quella che risulta la più economica di tutte le condizioni.

Il lavoro meccanico compiuto nella marcia in piano così calcolato dai dati di consumo energetico e di rendimento è solo di poco superiore a quello misurato direttamente col metodo della piattaforma: ciò conferma che l'energia consumata per camminare in piano a velocità ordinaria è quasi tutta impiegata nel compiere lavoro esterno positivo e negativo, mentre una quantità inapprezzabile viene impiegata a compiere lavoro interno (attriti, contrazioni statiche e così via). Questo lavoro interno invece aumenta notevolmente a elevata velocità, fino a salire, quando si cammini a 8,5 km/h, a circa la metà del lavoro esterno positivo compiuto.

Dai dati rilevati a varie velocità di marcia in piano, di cui un esempio è riprodotto nella illustrazione a pag. 16, si è costruito il diagramma presentato a pag. 20 in basso, dal quale insieme col lavoro meccanico totale esterno W_{TOT} sono indicate anche, in tratteggio, le curve delle sue componenti che sono il lavoro antigravitario, necessario per sostenere le oscillazioni verticali, W_V , e il lavoro necessario per sostenere le variazioni di velocità a ogni passo, W_F . Appare da questo schema che per velocità inferiori a 6 km/h il lavoro antigravitario W_V è superiore al lavoro cinetico, W_F , e quindi il lavoro totale compiuto può essere sostenuto unica-

mente dal lavoro antigravitario. A velocità superiore a 7 km/h il lavoro frontale è superiore a quello antigravitario, e non può quindi essere sostenuto che in parte da quest'ultimo: a velocità superiori a 6-7 km/h la spinta del piede non è soltanto diretta verso l'alto, ma verso l'alto e in avanti, e la componente orizzontale della spinta diventa sempre più importante con l'aumentare della velocità: entra quindi in gioco una forza che agisce direttamente nel senso della progressione. Il modello dell'uovo che rotola su un piano vale quindi soltanto per basse velocità di marcia.

Le linee in colore nell'illustrazione a pagina 20 in basso sono l'espressione della resistenza alla progressione, o della spinta equivalente, espressa in grammi per kg di peso del soggetto. Così risulta chiaramente che quando si cammini per esempio a 7 km/h si deve vincere una resistenza corrispondente a 40 g/kg di peso del soggetto.

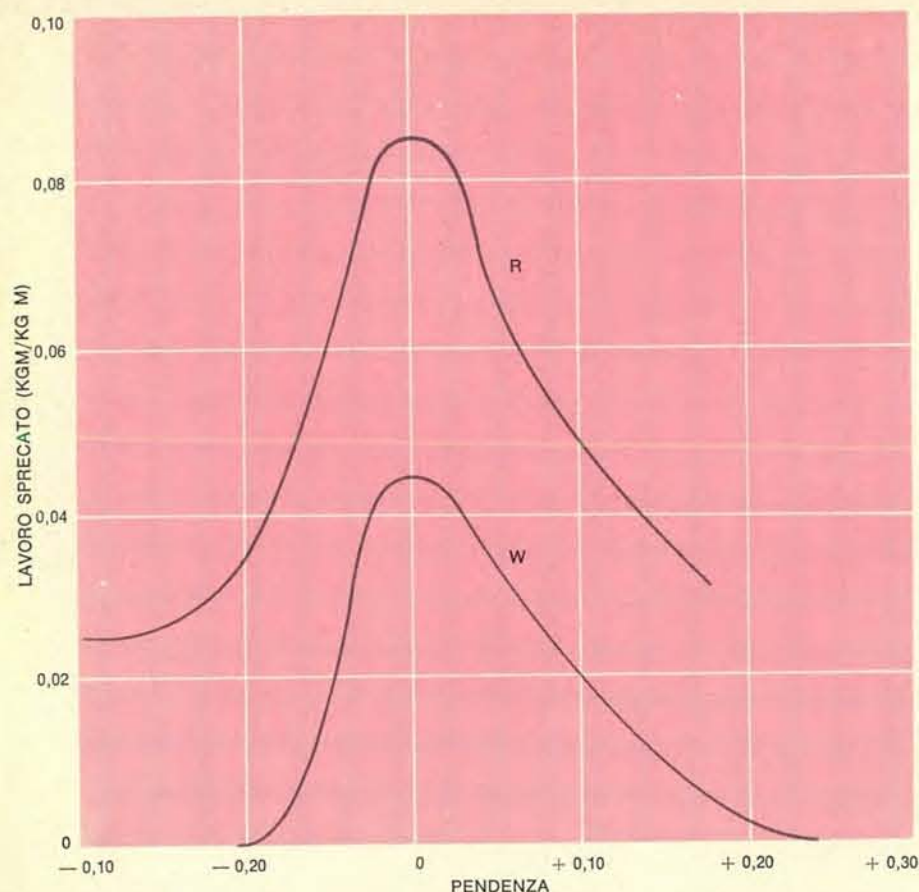
Applicando all'individuo che cammina una spinta costante nella direzione della progressione si potrebbe rimpiazzare la spinta dovuta all'attività dei muscoli. E questo sarebbe veramente il caso se la resistenza offerta dall'individuo alla progressione fosse impiegata a vincere una resistenza dovuta agli

attriti con l'aria, col suolo, o una resistenza gravitazionale. Questo invece non è il caso: quando si cammini in discesa a una inclinazione del terreno del 4 % agisce sul soggetto una spinta costante di 40 g/kg di peso nella direzione della progressione, una forza cioè dello stesso valore di quella che il soggetto deve vincere quando cammina in piano. Ma in quelle condizioni la spesa energetica non si riduce a zero, ma solo al 60 %, e anche aumentando ulteriormente l'inclinazione del terreno, la spesa energetica non scende mai al di sotto del 50%.

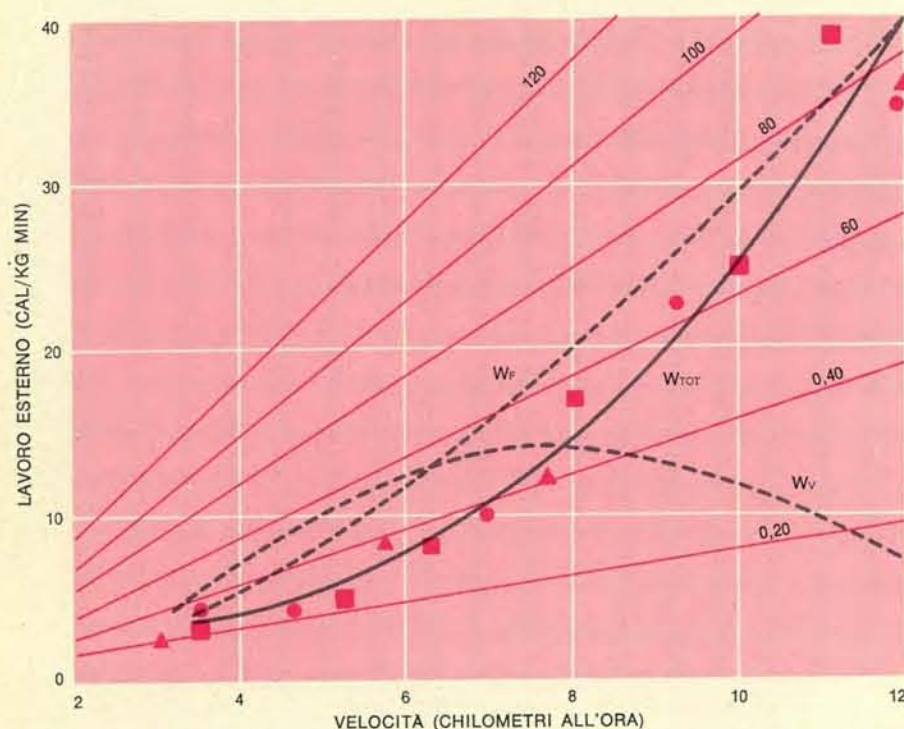
Che una spinta costante non possa sostituire completamente la spinta dovuta all'attività muscolare costituisce una ulteriore prova che l'energia spesa nella marcia in piano non è impiegata a vincere alcuna resistenza alla progressione, ma a eseguire lavoro positivo e negativo, alternativamente, nell'ambito del passo.

La spinta continua può ben sostituire interamente la forza muscolare in altri tipi di locomozione, come per esempio nella progressione in bicicletta, in pattini, in sci, (per esempio nello ski-lift), nel nuoto, ecc., nei quali si esegue solo lavoro positivo e in nessuna fase dell'esercizio si compie lavoro negativo.

Il lavoro muscolare che si fa nella marcia o nella corsa in piano potrebbe



Lavoro «sprecato» cioè lavoro compiuto in egual misura positivo e negativo (in ordinata) nella marcia alla velocità più economica (W) e nella corsa (R); il lavoro rappresentato in ascissa in questo schema è stato calcolato in salita (+) e in discesa (—).



Lavoro esterno totale (W_{TOT}), in cal/kg min in funzione della velocità di marcia in km/h, e sue componenti (linee tratteggiate). W_V indica il lavoro antigravitario e W_F il lavoro necessario per sostenere le variazioni di velocità a ogni passo. I differenti simboli si riferiscono a tre differenti soggetti. È importante rilevare che le linee sottili tracciate in colore indicano la resistenza in chilogrammi per km percorso e per chilogrammo di peso corporeo, o la spinta equivalente in grammi per kg di peso corporeo.

essere rimpiazzato da una spinta, ma questa dovrebbe essere alternativamente positiva (nella direzione del movimento) e negativa nelle varie fasi del passo. Una spinta positiva costante, come per esempio quella che si ha nella marcia in discesa, può sostituire soltanto il lavoro positivo fatto dai muscoli nella prima fase del passo, ma si sommerebbe al lavoro negativo che viene compiuto nella seconda fase. È ovvio che questa alternanza delle spinte è molto difficile da realizzare praticamente, tanto più che la spinta, sia positiva che negativa, non è costante per l'intensità, e ognuna dura una frazione diversa del ciclo del passo.

Soltanto nella marcia in salita e in discesa a elevate inclinazioni del terreno quasi tutto il lavoro viene impiegato a vincere la forza gravitazionale, e una spinta costante nella direzione della progressione della marcia in salita o in direzione inversa nella marcia in discesa può sostituire in buona parte la spinta dei muscoli.

Stabilite le leggi fondamentali della meccanica della marcia e della corsa, e la parte che la forza di gravità ha su questo esercizio, è possibile prevedere col calcolo come si svolge la locomozione in condizioni di gravitazione differenti da quelle della Terra, quali per esempio si verificano sulla superficie lunare, dove la gravitazione è ridotta a un sesto, o su pianeti a gravitazione maggiore, quale Giove ($g = 2,7$).

È ovvio che sulla superficie lunare il lavoro antigravitario compiuto a ogni passo, W_V , sarebbe ridotto a un sesto, della stessa entità cioè della riduzione del peso corporeo: conseguentemente anche l'energia cinetica, che dipende dall'energia potenziale, sarà ridotta di altrettanto: l'energia disponibile per la traslazione nel senso della progressione sarà quindi molto ridotta a ogni passo. Per di più, la durata del passo sarà notevolmente maggiore, perché la caduta del corpo in avanti è molto più lenta che sulla superficie della Terra, e mentre sulla Terra si possono compiere ordinariamente 100-120 passi per minuto, sulla Luna non è possibile compierne più di 40 circa, corrispondenti a una velocità di poco superiore a 2 km/h. Né si può rimediare a questo inconveniente caricando l'individuo con dei pesi, poiché aumenterebbe la massa del corpo e quindi corrispondentemente l'energia richiesta per la traslazione del corpo nel senso della progressione.

Quanto alla corsa, sarà difficile eseguire questo esercizio, perché essendo

per definizione la componente verticale della spinta del piede contro il suolo uguale al peso corporeo, la spinta totale dovrà essere molto misurata: la forza muscolare non varia quando si passi dalla Terra alla Luna, e perciò la spinta muscolare sarà presumibilmente molto maggiore della resistenza offerta dal ridotto peso del corpo. Il centro di gravità del corpo subirà degli spostamenti verticali notevoli, e la corsa si trasformerà in una *progressione per salti*. Anche il salto però avrà una durata (tempo di parabola) che sarà tanto maggiore quanto maggiore la spinta: e in ogni caso molto maggiore che sulla superficie della Terra. Necessariamente diminuirà sulla Luna la frequenza dei passi (o salti): d'altra parte tanto maggiore sarà la spinta, tanto maggiore potrà essere la sua componente orizzontale, e quindi la velocità massima di progressione.

Le condizioni nella corsa e nella progressione per salti sulla superficie lunare, per ciò che riguarda la frequenza dei passi, i chilogrammi di spinta del piede contro il suolo e l'inclinazione della spinta rispetto all'orizzontale in gradi, sono descritte nella illustrazione in questa pagina, per due condizioni di terreno compatto (coefficiente di attrito $k = 0,5$) e di terreno polveroso, avente un minimo coefficiente di attrito ($k = 0,2$). Appare dallo schema che mentre nella marcia e nella corsa, come sono convenzionalmente definite, la velocità di progressione sulla Luna è molto limitata, ricorrendo a quel terzo meccanismo che è la progressione a salti, si possono raggiungere dei valori di velocità uguali o superiori a quelli che si hanno sulla Terra, anche se il coefficiente di attrito del piede col suolo è molto basso. È un meccanismo di progressione di cui sulla superficie della Terra dispongono soltanto alcuni animali, come i canguri o le cavallette, nei quali la forza muscolare degli arti posteriori è molto superiore alla resistenza offerta dal peso corporeo.

Naturalmente quanto sin qui è stato descritto vale per l'individuo che sia libero di muoversi, come sulla superficie della Terra, e che non soffra di limitazioni imposte da altri fattori, quale per esempio la tuta spaziale.

Queste previsioni in effetti sono state riscontrate esatte dall'osservazione alla televisione del comportamento degli astronauti sul suolo lunare.

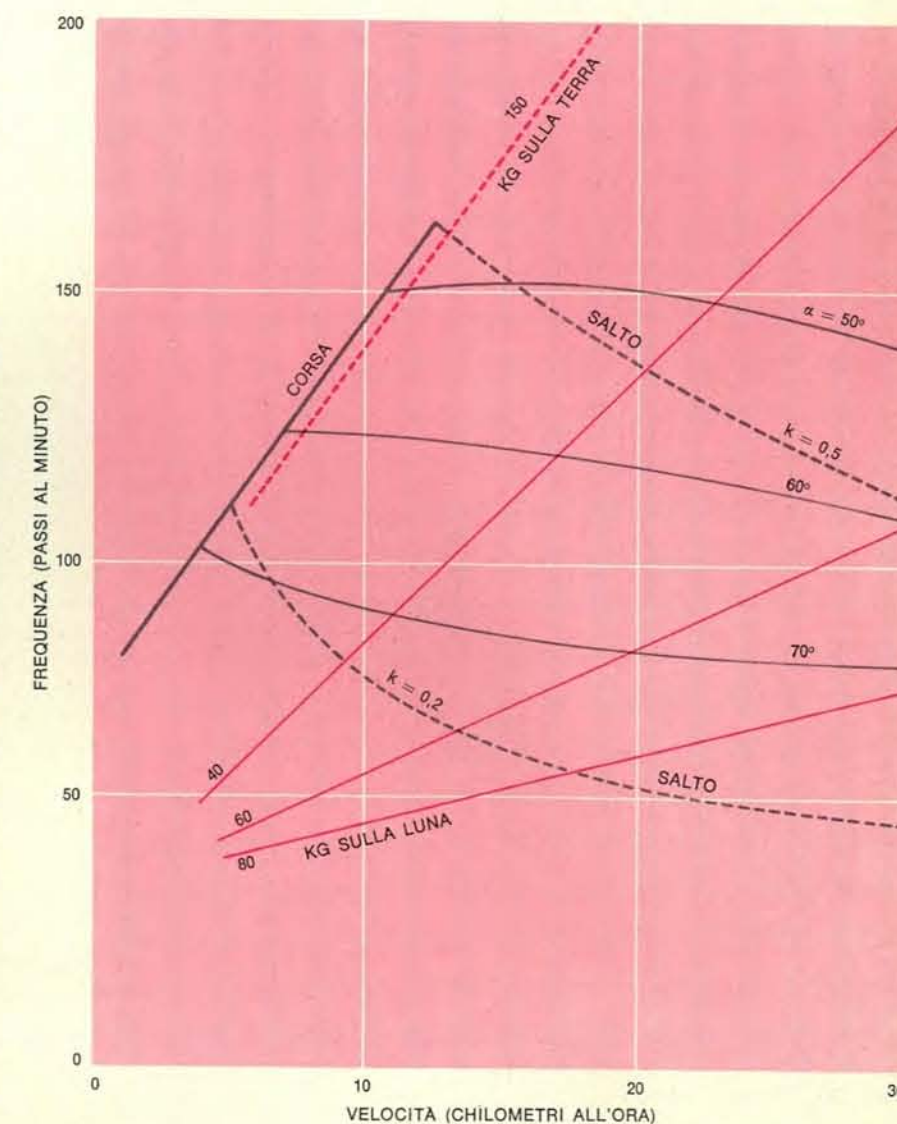
Nella corsa o nel salto sulla Luna, la distensione muscolare, e l'accorciamento che a essa segue, non possono aver luogo con quella sequenza di tempo ottimale, perché possa essere sfrut-

tata appieno l'energia elastica dei muscoli: conseguentemente l'energia richiesta per la locomozione sulla Luna è certamente maggiore di quella che può essere desunta in considerazione della sola ridotta gravitazione.

Infine, si è parlato finora soltanto della velocità di progressione a velocità costante. Nella corsa rapida, come nei cento metri in gara, il lavoro per sostenere l'accelerazione alla partenza è dovuto principalmente alla elevata frequenza dei passi, che sulla Terra sale a 300 e oltre per minuto. Questa sarà molto minore sulla Luna, e l'accelerazione quindi sarà corrispondentemente minore. Se la corsa dei cento metri si dovesse fare sulla Luna, non si batterebbe certamente il record di circa 10

secondi, che si è potuto raggiungere sulla Terra: i cento metri non sarebbero neppure sufficienti per raggiungere la velocità massima di progressione che sulla Terra viene raggiunta già dopo pochi metri dal punto di partenza.

Il conoscere le leggi della meccanica della locomozione non ha soltanto una importanza culturale; innumerevoli applicazioni essa può avere in pratica, oltre che in fisiologia spaziale, come si è visto, nel campo dello sport e in quello del lavoro; inoltre si può con fiducia prevedere che i nuovi metodi e l'indirizzo introdotti nello studio della marcia e della corsa troveranno larga applicazione nello studio della meccanica di altri esercizi.



Frequenza dei passi in funzione della velocità sulla Terra (linea spessa). La stessa vale anche per le condizioni sulla superficie lunare fino alla massima velocità di corsa indicata all'origine dalle linee tratteggiate « salto » (che valgono soltanto per la superficie lunare). La frequenza dei passi aumenta con la velocità nella corsa, diminuisce invece nella progressione a salti. Sono indicate anche le linee iso-spinta che indicano la forza esercitata dal piede a ogni passo sulla superficie lunare (linee continue in colore), o su quella terrestre (linea punteggiata in colore). Le linee iso-direzione della spinta del piede sul suolo sono indicate nello schema qui presentato in gradi rispetto all'orizzontale, e valgono soltanto per il particolare tipo di progressione che si realizza sul suolo lunare.