

GRANDI TEMI

LA LOCOMOZIONE: VISIONE GENERALE DEI PROBLEMI MECCANICI

di Giovanni A. Cavagna

Il sistema locomotore promuove il moto del corpo tramite un insieme di motori (i muscoli scheletrici) che compiono lavoro su di una macchina (il sistema delle leve ossee) la quale a sua volta utilizza tale lavoro per interagire con l'ambiente esterno.

Un motore è un trasformatore di energia: ad esempio il motore a scoppio dell'automobile trasforma l'energia chimica della benzina in energia meccanica tramite un'esplosione che spinge con forza il pistone nel cilindro. Il prodotto della forza (in questo caso applicata al pistone) per lo spostamento che essa provoca (quello del pistone) si chiama lavoro meccanico motore o positivo.

Nel caso della locomozione animale, il motore è rappresentato dai muscoli scheletrici: in questo caso l'energia chimica trasformata è quella introdotta con gli alimenti e la trasformazione in lavoro meccanico avviene nel sarcomero, che si può considerare l'unità funzionale del muscolo. Lo sviluppo di forza e lo spostamento, cioè l'esecuzione di lavoro meccanico, hanno luogo nel sarcomero grazie allo scorrimento dei filamenti di actina su quelli di miosina verso il

centro del sarcomero: ciò provoca l'accorciamento del sarcomero e quindi del muscolo. Se l'accorciamento ha luogo contro un carico esterno applicato all'estremo del muscolo, ad esempio un peso che il muscolo è capace di sollevare, la forza muscolare compirà lavoro meccanico positivo.

Così come lo spostamento del pistone nel cilindro non è sufficiente da solo per promuovere il moto dell'automobile, ma sono necessarie varie strutture che trasmettono questo moto originario alle ruote, similmente l'accorciamento dei muscoli riesce a promuovere il movimento del corpo *in toto* durante la locomozione soltanto grazie al sistema scheletrico. Le leve ossee, a cui i muscoli sono collegati, costituiscono una *macchina*, cioè un sistema passivo avente la funzione di trasformare il lavoro motore fornito dai muscoli in movimento del corpo rispetto all'ambiente. Nella locomozione terrestre, come nel volo, il movimento avviene attraverso l'aria che tende a frenare il moto del corpo con una forza di attrito tanto più grande quanto maggiore è la velocità di progressione. Lavoro meccanico dovrà quindi essere compiuto per vincere la resistenza dell'aria e questo lavoro meccanico sarà uguale al prodotto della distanza percorsa (spostamento) per la resistenza del mezzo (forza). Il lavoro compiuto contro la forza di attrito offerta dal suolo è nullo in quanto, se non si scivola, non si ha spostamento del piede rispetto al suolo.

Uno schema generale delle trasformazioni energetiche che hanno luogo durante la locomozione può quindi essere quello illustrato in Fig. 4 (1). I muscoli trasformano energia chimica in lavoro meccanico motore e questo a sua volta è utilizzato dal sistema di leve per sostenere lo spostamento del corpo contro la resistenza del mezzo. Il rendimento complessivo della locomozione sarà dato dal rapporto tra lavoro meccanico compiuto contro la resistenza del mezzo ed energia chimica consumata per sostenere la locomozione. Il significato di tale rapporto è simile a quello, più comunemente usato, del rapporto tra chilometri percorsi in automobile e litri di benzina consumata.

tà di moto appena persa e mantenere così la velocità costante (cioè la velocità media in ogni passo uguale a quella dei passi successivi).

In sintesi, la presenza del vincolo tra piede e suolo causa necessariamente una frenata verso l'avanti del centro di gravità del corpo e quindi lavoro meccanico deve essere compiuto per ripristinare l'energia cinetica persa. Ciò è vero in tutti i tipi di locomozione terrestre con arti studiati (2).

Il sistema locomotore cerca di ridurre l'effetto negativo di questa frenata verso l'avanti con due meccanismi fondamentali: il *meccanismo rigido e pendolare della marcia*, in cui durante la frenata verso l'avanti il centro di gravità si solleva, ed il *meccanismo estensibile ed elastico della corsa*, in cui durante la frenata verso l'avanti il centro di gravità si abbassa (1, 2, 3). Nel meccanismo della marcia viene aumentato il rendimento di trasmissione grazie al recupero di energia meccanica che ha luogo con un meccanismo simile a quello del pendolo. Nel meccanismo della corsa viene aumentato il

rendimento della contrazione muscolare grazie all'accumulo e restituzione di energia meccanica nel ciclo stiramento-accorciamento del muscolo contratto. In ambedue i casi tuttavia lavoro meccanico deve essere compiuto per sostenere le variazioni di energia meccanica del centro di gravità del corpo dovute al vincolo tra piede e suolo; questo lavoro è chiamato *lavoro meccanico esterno*

Dato che il piede ad ogni passo, durante il periodo di contatto, ha velocità rispetto al suolo uguale a zero, è evidente che per mantenere la propria velocità media durante un ciclo completo del suo movimento uguale a quella del centro di gravità del corpo, esso dovrà essere accelerato ad ogni ciclo da una velocità uguale a zero rispetto al suolo, fino ad un valore superiore alla velocità media. Anche se la velocità media di progressione è costante, la velocità istantanea degli arti inferiori deve quindi subire continuamente variazioni di velocità. Per *lavoro meccanico interno* si intende il lavoro che è necessario compiere per sostenere le variazioni di velocità

relativa degli arti rispetto al centro di gravità.

In conclusione, la locomozione terrestre è caratterizzata da un basso rendimento di trasmissione dovuto al vincolo tra piede e suolo. Questo implica lavoro per sostenere le variazioni di energia meccanica del centro di gravità del corpo rispetto all'ambiente e degli arti rispetto al centro di gravità.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Cavagna GA. Muscolo e locomozione. 1988. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- 2) Cavagna GA, Heglund NC, Taylor CR. Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am J Physiol* 1977; 233 (5): R243-R261
- 3) Cavagna GA, Thys H, Zamboni A. The sources of external work in level walking and running. *J Physiol (London)* 1976; 262: 639-657
- 4) Tucker VA. Aerial and terrestrial locomotion: a comparison of energetics. In: Bolis L, Schmidt-Nielsen K, Maddrell HP. (Eds). *Comparative Physiology*. 1973 North Holland Publishing Company, Amsterdam-London.