

Locomozione terrestre e gravità

[1, 2] La locomozione **terrestre** che si avvale di arti obbliga il baricentro corporeo ad innalzarsi e abbassarsi periodicamente durante il passo, indipendentemente dalle varie andature possibili. Anche solo per questa semplice osservazione, è intuibile che la gravità abbia un ruolo, in quanto le variazioni dell'**energia potenziale** (massa x g x altezza) del baricentro devono (parzialmente) essere sostenute dalla contrazione muscolare.

[3] La meccanica del cammino (o marcia, passo nei quadrupedi) si basa sul paradigma del pendolo. Infatti gli arti superiori dei bipedi e quello inferiore che sta oscillando in avanti si comportano come **pendoli diritti**, mentre l'arto in contatto con il terreno, ed il baricentro corporeo immaginato come posizionato al suo estremo superiore, si muove con un **pendolo invertito**. In ogni caso, è noto che nei pendoli l'energia potenziale si scambia con quella cinetica, che dipende dal quadrato della velocità. E' da questo scambio che il pendolo (ideale) trae la sua capacità di oscillare all'infinito, mantenendo l'energia meccanica totale costante. Il cammino utilizza la stessa strategia di conservazione dell'energia, anche se solo al **60%** dell'efficacia di un pendolo ideale.

[4] La meccanica della corsa, ed del trotto nei quadrupedi, sfrutta le proprietà **elastiche** dei tendini per immagazzinare energia durante la prima metà dell'atterraggio dal volo, per poi restituire una gran parte durante la seconda metà. Anche in questo caso la locomozione può procedere facendo **risparmiare energia metabolica** ai muscoli propulsori. Il paradigma meccanico è quello della **palla** che rimbalza, o del saltarello (pogo-stick), gioco costituito da una barra verticale con pedane ed una molla che viene compressa e rilasciata ad ogni contatto con il terreno.

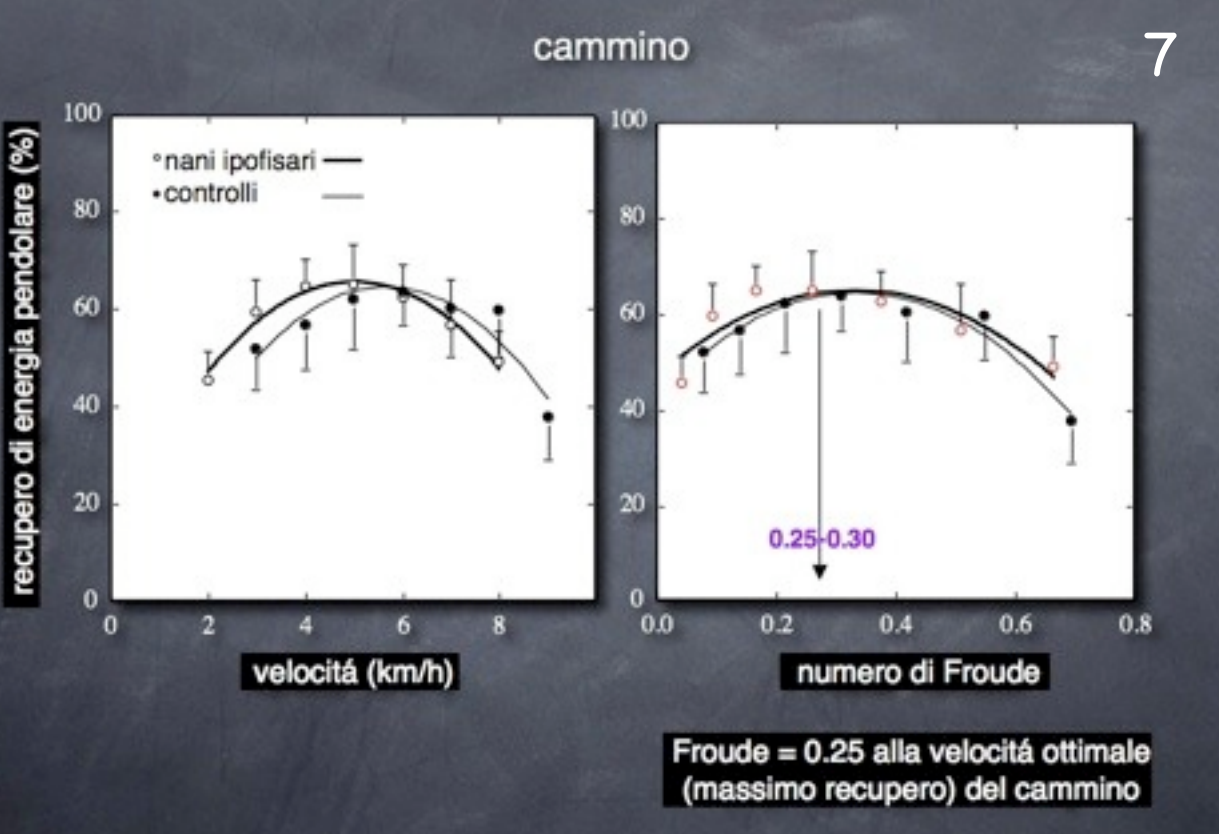
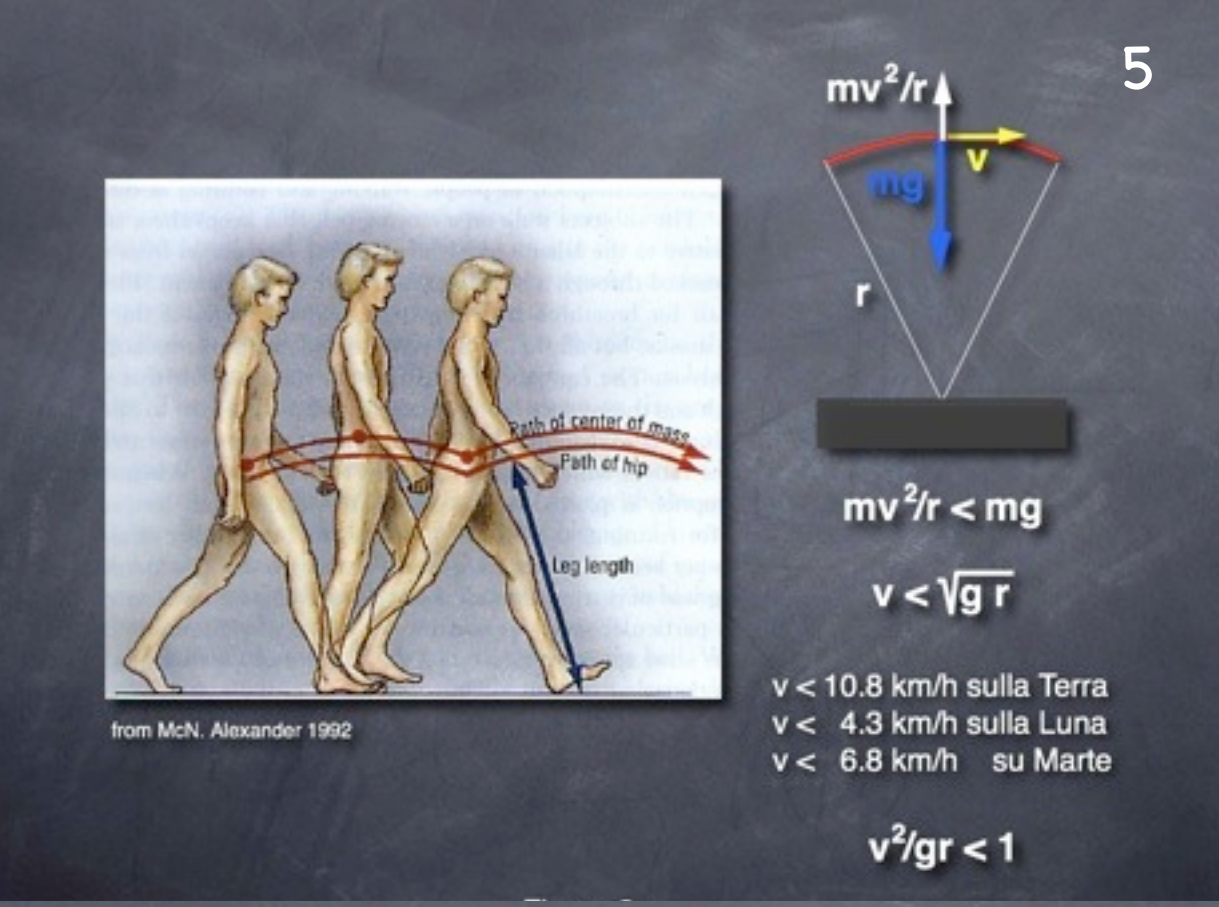
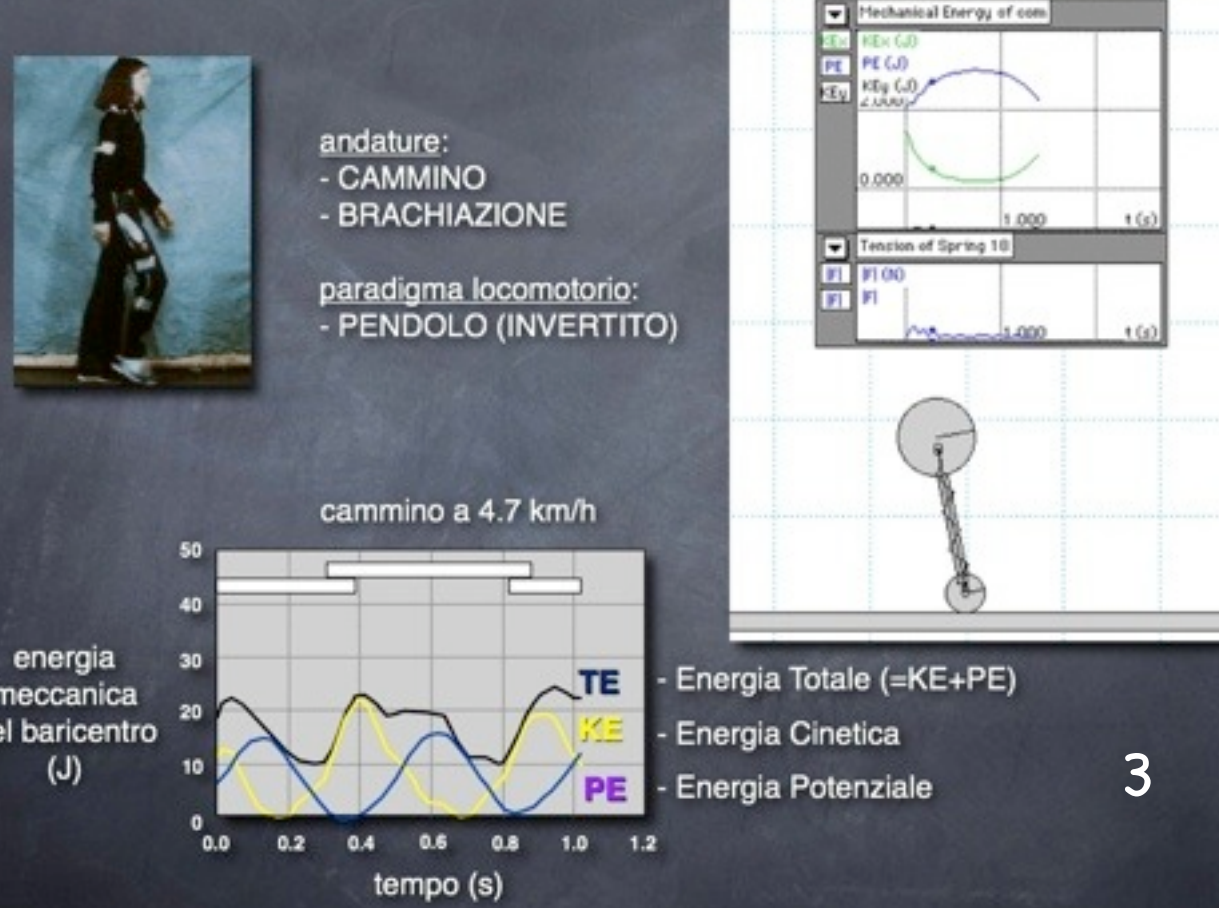
[5] Ma perché si passa dal cammino alla corsa? A parte la classica (e validissima) argomentazione secondo la quale il **costo metabolico** salirebbe troppo se si volesse continuare a camminare alle velocità della corsa, esistono **ragioni meccaniche** che spiegano la necessità di transizione tra queste andature. La traiettoria che descrive il baricentro corporeo durante il singolo passo è approssimativamente un arco di cerchio, che se percorso a velocità v comporta una forza centrifuga uguale a $(m \times v^2)/r$, dove r è il raggio di curvatura (assimilabile alla lunghezza dell'arto inferiore o all'altezza massima del baricentro). Al culmine della traiettoria questa forza deve essere inferiore a quella peso ($m \times g$) per assicurare il mantenimento del **contatto** con il terreno. Ciò avviene fino a che $v < (g \times r)^{1/2}$, (corrispondente a $v^2/(g \times r) < 1$, vedi oltre) ed è evidente che una differente accelerazione di gravità condizionerebbe la velocità limite del cammino.

[6] Ma $v^2/(g \times r)$ è anche noto, nella scienza della locomozione, come numero di Froude (o Fr). Questa variabile è stata introdotta da William Froude, ingegnere navale della metà '800, per poter creare modelli di navi in scala ridotta in grado di comportarsi in acqua come la versione in dimensioni reali. La questione era: conoscendo la **velocità della nave**, a quale velocità devo far muovere il modellino per avere una **simulazione** realistica della dinamica dell'interazione tra scafo e acqua? Froude capì, dopo alcuni **insuccessi** su larga scala, che era importante mantenere costante il rapporto tra energia cinetica e potenziale (che risulta appunto proporzionale a $v^2/(g \times r)$) dell'onda generata dalle due prue, dato che questo è uno degli aspetti più importanti del consumo della navigazione in superficie. Utilizzando come r una lunghezza tipica dei due vascelli, fu così possibile stabilire che $v_{nave2} = v_{nave1} \times (\text{lunghezza}_2/\text{lunghezza}_1)^{1/2}$.

Questo concetto fu introdotto da D'Arcy Thomson e divulgato da Robert McNeill **Alexander** in ambito biologico. L'applicazione più immediata fu di poter comparare soggetti o animali di taglia differente esaminandoli durante locomozione a **velocità dinamicamente equivalenti**, attraverso la stessa equazione scritta per le navi. Infatti, come accennato, anche il cammino si basa sul continuo scambio tra energia cinetica e potenziale del baricentro corporeo e, ad esempio, l'equazione di Froude ci dice che un bambino di **altezza 50%** rispetto alla madre camminerà in modo paragonabile ad una **velocità pari al 70%** di quella della madre.

[7, 8] Fino ad oggi i successi del numero di Froude si basano sulla scoperta che individui di taglia diversa riescono a ottenere il massimo di scambio energetico pendolare per $Fr=0.25$, e che animali diversi per specie (incluso l'uomo) e dimensioni passano dal cammino alla corsa ad $Fr=0.5$. Inoltre, per quanto detto sopra, $Fr=1$ costituisce il limite massimo per garantire che non si tratti di corsa.

[9, 10] Anche il passaggio dal **passo al trotto** e al **galoppo** si spiega in termini di **costo metabolico** con, per ogni andatura delle **velocità ottimali**. Nei quadrupedi il passaggio dal trotto al galoppo avviene a $Fr=2.5$.

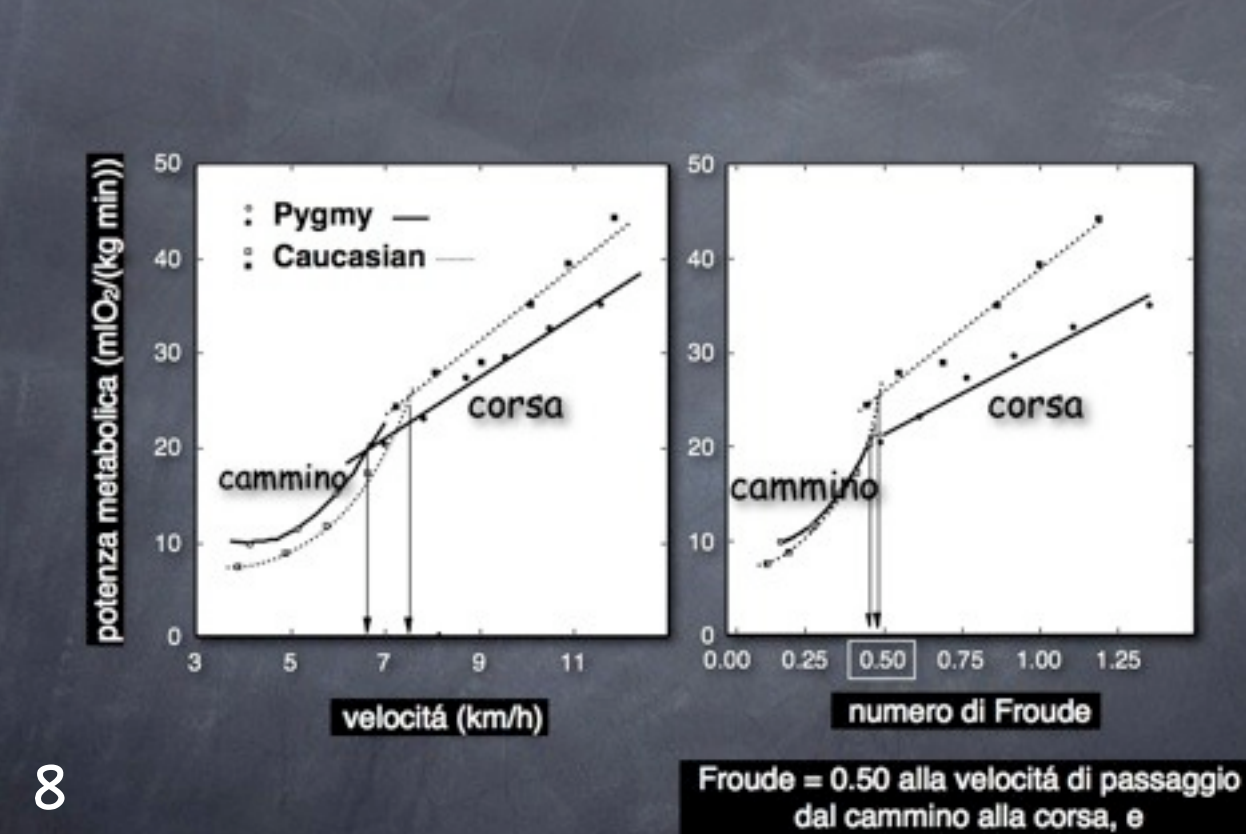
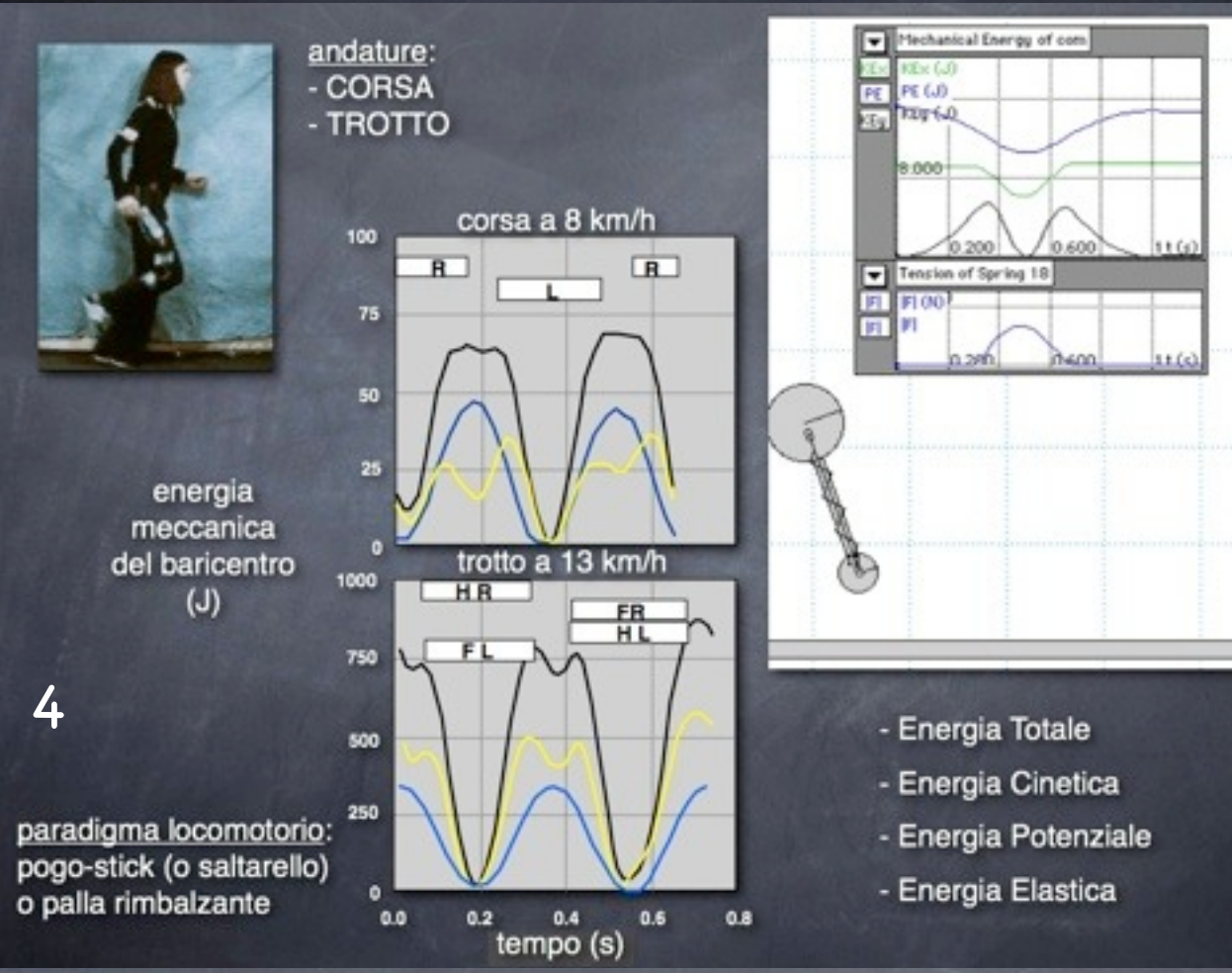


9 Quadrupedi: dal passo al galoppo

- Durante il passo, la proiezione del centro di massa cade all'interno del triangolo formato dalle 3 zampe di appoggio.
- Il trotto è un'andatura simmetrica: le sequenze di appoggio anteriore e posteriore sono sfasate del 50%.
- Il galoppo è un'andatura asimmetrica con una o due fasi di volo, nelle quali tutte le zampe sono sollevate da terra. Ma perché si passa dal passo al trotto, al galoppo?

comprendere i determinanti della locomozione → paradigma meccanico di riferimento → applicazioni in condizioni differenti → predizioni

esempi: - qual'è la massima altezza raggiungibile nel salto con l'asta sulla Luna?
- qual'è la massima altezza raggiungibile nel salto con l'asta assistito dalla bicicletta su Marte?



Selezione e ottimizzazione

- L'ottimizzazione è una branca della matematica che si occupa di trovare la miglior soluzione possibile a un dato problema
- Ricordando le parole di Darwin a proposito della Selezione Naturale, il processo evolutivo tenderà a favorire le soluzioni "migliori"
- Al crescere della velocità, i costi metabolici di marcia, trotto e galoppo variano in maniera differente: ogni andatura ha la sua velocità "ottimale"

[11, 12] Un uso più recente del numero di Froude riguarda, invece della comparazione di soggetti di taglia differente alla stessa gravità, il paragone tra soggetti della **stessa taglia** (o ancor meglio lo stesso soggetto) a **differenti gravità**. Adottando lo stesso razionale appena illustrato otteniamo $v_{pianeta2} = v_{pianeta1} \times (\text{gravità}_2/\text{gravità}_1)^{1/2}$. Ad esempio, sulla Luna (=1/6 della gravità terrestre) potremo camminare in modo dinamicamente simile solo riducendo la velocità al **40%** di quella sulla Terra (40% è la radice quadrata di 16%). Come nel caso degli effetti della taglia sulla velocità della locomozione, siamo di fronte ad un comportamento non lineare ma mediato dalla radice quadrata dei rapporti (di taglia o di gravità).

standardizzazione della velocità per movimenti pendolari: EFFETTO della GRAVITA'

planet 1 (Luna 0.17 G, Marte 0.38 G) Terra 1.0 G planet 2 (Giove 2.36 G)

$FROUDE\ number = \frac{v^2}{g \cdot h} = \frac{KE}{PE}$ applicazione: qual'è sulla Luna la velocità del cammino dinamicamente equivalente a quella sulla Terra?

$\frac{v_{planet}^2}{g_{planet} \cdot h} = \frac{v_{Earth}^2}{g_{Earth} \cdot h}$

$v_{planet} = v_{Earth} \sqrt{\frac{g_{planet}}{g_{Earth}}}$

$v_{Moon} \approx 0.4 v_{Earth}$

Se da una parte risulta evidente che in pianeti ipogravitari la nostra locomozione abituale dovrà avvenire a velocità inferiore, altri studi hanno dimostrato che una terza forma di locomozione, lo **'skipping'** o saltarello caratterizzato dal contatto in successione dei due arti inferiori seguito dalla fase di volo, andatura tipica dei bambini poco utilizzata dagli adulti, possa diventare l'andatura di scelta per potersi muovere più velocemente. In situazioni **ipergravitarie** potremo invece camminare (e forse correre) a **velocità superiori** a quelle terrestri, compatibilmente con le massime forze generabili dai muscoli.

Bibliografia:
Alexander R. McNeill (2003). Principles of Animal Locomotion, Princeton University Press.
Minetti A. E. 2001. Walking on other planets. Nature 409: 467-469.

