

# LOCOMOZIONE UMANA E ANIMALE A DIFFERENTI GRAVITÀ: ADATTAMENTI BIOMECCANICI ED EFFETTI METABOLICI

ALBERTO ENRICO MINETTI (\*)

Nota presentata dal m.e. Edgardo D'Angelo  
(Adunanza del 29 novembre 2018)

SUNTO. – La prospettiva delle Missioni Apollo sulla Luna aveva allertato i fisiologi della locomozione alcuni anni prima delle imprese spaziali, stimolandoli a compiere studi e proporre teorie sull'adattamento del nostro organismo, nei suoi aspetti muscolo-scheletrici, a muoversi in condizioni di mutata accelerazione di gravità. Gli studi di Margaria e Cavagna, dedicati a salti e andature, avevano anticipato con successo che sulla superficie lunare gli astronauti avrebbero camminato con difficoltà, mentre la corsa sarebbe stata sostituita da un incedere a balzi. Da allora, nonostante la mancanza di altre simili missioni, molti altri ricercatori di tutto il mondo hanno studiato questo argomento, sia in termini sperimentali (ipo/ipergravità simulata) che teorici. L'approccio modellistico, basato sulla similarità dinamica (Numero di Froude), ha contribuito a spiegare le scelte spontanee delle andature adottate dagli astronauti sulla Luna. I risultati sperimentali combinati di meccanica ed energetica delle diverse forme di locomozione hanno indicato come il costo metabolico delle varie andature possibili (cammino, corsa, skipping, hopping), molto differente sulla Terra per ognuna di loro (rispetto al cammino, da 2x a 10x), tende a diventare progressivamente molto simile a bassi livelli di gravità. Ciò suggerisce che il costo per sostenere il peso corporeo costituisce una porzione determinante del dispendio energetico e, insieme all'analisi di altre variabili biomeccaniche, sembra promettere di chiarire alcuni aspetti ancora oggi irrisolti della locomozione terrestre (ad esempio l'indipendenza dalla velocità del costo metabolico della corsa).

---

(\*) Professore Distaccato presso il Centro di Ricerca "Beniamino Segre", Accademia dei Lincei, Professore di Fisiologia, Laboratorio di Fisiomeccanica della Locomozione, Università degli Studi di Milano, Italy. E-mail: alberto.minetti@unimi.it

\*\*\*

ABSTRACT. – A few years before Apollo Missions to Moon, locomotion physiologists promoted research and discussion about the potential adaptation of human body, the musculo-skeletal apparatus in particular, to an environment subject to a much smaller gravity acceleration than on Earth. Rodolfo Margaria and Giovanni Cavagna, who had just started investigating the fundamental mechanical paradigms of terrestrial locomotion, built a gravity-emulation facility in a 15 m tall vent shaft in Milano to study how jumping ability was affected by low-gravity. The combined knowledge led them to correctly predict that humans on the Moon would have walked at a very low pace and the alternative to an impaired running would have been a bouncing gait like hopping. Since then, other scientists around the world kept on researching on this subject, both experimentally and through mathematical models. Models based on ‘dynamic similarity’ (Froude Number) have confirmed that spontaneous locomotion adopted by astronauts was predictable. Recent biomechanical and metabolic experiments in the rebuilt emulation facility in Milano indicated that gaits with very different economy on Earth (running, skipping and hopping range from 2x to 10x, when compared to walking) progressively tend to have the same cost of transport when gravity decreases, and they are all alike at Moon gravity. This suggests that the energy devoted to sustain body weight represents a crucial determinant in the propulsion economy. Together with further biomechanical analysis, these data from emulated outer space are promising clues toward a better understanding of still unsolved mysteries of terrestrial locomotion (as the speed independence of metabolic cost of running).

## 1. INTRODUZIONE

L'esplorazione spaziale e una delle sue conseguenze a lungo termine, la colonizzazione di altri corpi celesti, costituiscono non solo l'estremizzazione della naturale curiosità umana ma una grande opportunità di espansione della ricerca scientifica e tecnologica, come dimostrato ad esempio dagli importanti esperimenti e risultati ottenuti in microgravità nei laboratori della International Space Station. La colonizzazione spaziale, aldilà dal sembrare un argomento puramente fantascientifico, potrebbe inoltre essere un giorno l'ultima risorsa per salvare l'umanità dall'estinzione per cause interne (per esempio, epidemie incurabili) o esterne (grandi meteoriti). Quindi possiamo attenderci uno sviluppo crescente di queste esplorazioni dove, oltre a rover e robot antropomorfi, vedremo cimentarsi con gli spostamenti su suoli non terrestri esseri umani (e presumibilmente anche animali, inizialmente quelli domestici) il cui sistema muscolo-scheletrico si è evoluto in 3-4 milioni di anni per funzionare a gravità terrestre.

Oltre ad altri importanti adattamenti fisiologici che dovranno essere assistiti in parte dalle condizioni ambientali locali e dai progressi tecnologici fino ad allora sviluppati, le diverse condizioni gravitazionali rappresenteranno una sfida adattativa che può essere studiata sulla Terra in anticipo. Del resto, nonostante che il procedere dell'esplorazione spaziale ci abbia mostrato tempi lunghi, l'evoluzione naturale verso lo sviluppo di soluzioni adattative stabili dell'apparato locomotorio sarebbe, dal momento dell'esposizione a una gravità diversa, così lenta da rendersi inutile.

La presente disanima intende ripercorrere brevemente quanto oggi conosciuto sulla biomeccanica e bioenergetica delle usuali andature bipedali (con qualche accenno a quelle quadrupedali) sulla Terra, riportando anche i risultati di ricerche effettuate in emulazioni locomotorie a gravità differenti da quella della nostra evoluzione.

## 2. PARADIGMI LOCOMOTORI

Il cammino, l'andatura che adottiamo per le basse velocità e che si basa sull'alternanza dei passi senza discontinuità tra gli appoggi sul terreno, prevede una traiettoria del baricentro corporeo che è assimilabile ad un pendolo capovolto. Analisi delle energie meccaniche coinvolte indicano che durante il ciclo locomotorio energia potenziale (dovuta all'altezza) e cinetica (proporzionale al quadrato della velocità) del baricentro variano (parzialmente) in modo reciproco, proprio come in un pendolo. Ciò implica che l'energia meccanica totale (la somma delle due precedenti) ha un'escursione inferiore alla somma delle escursioni delle sue due componenti, quindi parte del lavoro meccanico necessario per camminare viene risparmiata dal 'paradigma pendolare' [1].

La corsa, andatura che adottiamo per muoverci più velocemente quando il cammino non è più praticabile, e che si basa sull'alternanza dei passi con una fase di volo tra i due, vede il baricentro corporeo muoversi approssimativamente lungo una sorta di senoide, la cui parte inferiore avviene durante il contatto con il terreno, e quella superiore costituisce la fase di volo. La fisica ci dice che quest'ultima fase è una traiettoria balistica (parabolica), mentre l'analisi biomeccanica (e indirettamente la bioenergetica) mostra che nella prima fase le energie potenziale e cinetica variano simultaneamente, come avviene in una molla che viene prima compressa e poi rilasciata [2]. L'atterraggio dalla fase di volo fa sì che i

muscoli e i tendini debbano gestire questa diminuzione e successivo incremento dell'energia totale del baricentro, e la natura elastica dei tendini permette, anche in questa andatura, di conservare parte dell'energia meccanica totale in modo che i muscoli debbano fornire un lavoro inferiore a quello atteso sulla base della semplice traiettoria osservata. Possiamo dire che il paradigma locomotorio della corsa, la prima andatura rimbalzante, è il 'saltarello' ('pogo-stick' per gli anglosassoni), cioè quel bastone con pedane e molla incorporata che consente ai bambini di divertirsi saltando da un punto all'altro.

Il consueto repertorio locomotorio umano si fermerebbe qui se non ci fosse un'andatura che i bambini utilizzano occasionalmente in età pre-adolescenziale chiamata 'skipping' (la miglior corrispondenza in italiano è 'galoppino'). È costituita da una combinazione (non solo cinematica) tra cammino e corsa, in quanto 2 passi eseguiti senza discontinuità con il terreno precedono una fase di volo [3]. Nonostante che l'analisi dinamica mostri anche un andamento delle energie potenziale e cinetica del baricentro corporeo simile a quello delle altre due andature, quindi con vantaggi attesi della combinazione dei rispettivi risparmi di energia meccanica totale (e i paradigmi pendolare e pogo-stick), lo skipping con il suo elevato costo energetico misurato e il suo utilizzo episodico rimane una curiosità fisiomeccanica nel repertorio locomotorio terrestre (la sua rilevanza emerge proprio in ipogravità, come si discuterà più avanti).

Per quanto riguarda la bioenergetica, che studia il costo metabolico della progressione alle diverse andature, le conoscenze acquisite indicano che il cammino è la modalità più economica per muoversi lungo un'unità di distanza (ed ha il minimo costo alla nostra velocità spontanea), la corsa è più costosa (e indipendente dalla sua velocità) e lo skipping lo è ancor di più, nonostante che lo si adotti a velocità intermedie tra cammino e corsa [3].

L'importanza di catalogare le andature in base ad un paradigma meccanico caratteristico ci consente di capire la dinamica della locomozione anche quando il numero di arti eccede il numero due: nei quadrupedi, ad esempio, il 'passo' corrisponde a due bipedi che camminano (sfasati del 25% del ciclo), il trotto equivale alla corsa (i due bipedi sono sfasati del 50%) e le diverse forme del galoppo possono essere viste come due umani che procedono con lo skipping (fase  $\leq 50\%$ ). Quindi la loro biomeccanica segue gli stessi paradigmi che negli umani (3).

Dato che i 3 paradigmi coinvolgono in vario modo le dimensioni corporee (si pensi alla lunghezza del pendolo invertito) e la gravità

(energia potenziale e sue trasformazioni in cinetica) si capisce come le modificazioni di queste 2 variabili possano influire sulla praticabilità e sul costo metabolico delle differenti andature.

### 3. INVARIANTI PER DIMENSIONI CORPOREE E GRAVITÀ

Non stupisce che tra i due effetti citati sulla dinamica locomotoria quello delle dimensioni corporee sia stato il più studiato negli ultimi 40-50 anni. Uno dei contributi più originali è stato di importare in biologia una grandezza adimensionale introdotta da un ingegnere navale della fine del XX° secolo, William Froude, per rispondere alla domanda: a quale velocità i bambini, considerata la bassa statura, camminano in modo 'dinamicamente simile' al cammino dei propri genitori (risposta intuitiva: a una velocità più bassa, dato che è osservazione comune che se una mamma cammina alla propria velocità spontanea il bambino segue correndo). Il numero di Froude ( $Fr = v^2/(g \cdot l)$ ), dove  $v$  è la velocità di progressione,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $l$  una lunghezza corporea caratteristica, ad esempio dell'arto inferiore), una grandezza sostanzialmente corrispondente al rapporto tra energia cinetica e potenziale, inventata per ottenere inferenze attendibili da modelli in scala sul comportamento dinamico della nave da costruire (la cui velocità dipendeva - anche - dall'altezza dell'onda innalzata dalla prua), è stato adottato dai biomeccanici come invariante, sia per i bipedi che per i quadrupedi (e ulteriormente estendibile), nel confronto locomotorio tra taglie differenti [4]. Per tutti (grandi e piccoli, bipedi e quadrupedi) è risultato  $Fr = 0.25$  come la velocità adimensionale per la similarità dinamica quando il cammino è metabolicamente ottimale,  $Fr = 0.5$  per quella di transizione dal cammino alla corsa, con  $Fr = 1$  che costituisce il limite di velocità oltre il quale il cammino non è più meccanicamente utilizzabile ed è necessario passare ad andature rimbalzanti. Ritornando all'esempio citato, un bambino alto la metà della madre camminerà in modo dinamicamente simile a lei (cioè uguale  $Fr$ ) se adotterà una velocità del 30% inferiore ( $\sqrt{0.5}=0.7$ ,  $1-0.7= -30\%$ ). Il numero di Froude per i confronti locomotori di soggetti di dimensioni differenti, e durante l'accrescimento corporeo, ha fornito importanti risultati negli ultimi decenni [5, 6, 7]. Essenzialmente si sono valutate le interrelazioni tra velocità e lunghezza caratteristica a parità di gravità.

Ma Froude permette anche di studiare le relazioni tra velocità e gra-

vità, a parità di lunghezza (della gamba, ad esempio). Una tipica domanda alla quale si può rispondere è: rispetto alla propria velocità spontanea del cammino sulla Terra, uno stesso soggetto (cioè con le stesse dimensioni corporee) a che velocità camminerebbe sulla Luna ( $g/6$ ) in modo dinamicamente equivalente? Al 40% ( $1/6=0.16$  e  $\sqrt{0.16}=40\%$ ) di circa 5.5 km/h, dunque a circa 2.4 km/h. Questo semplice, ed approssimato risultato ci indica che gli scambi pendolari tipici del nostro modo di camminare limitano la nostra velocità massima in condizioni di ipogravità. Molti dei risultati pubblicati su lavori sperimentali di emulazioni ipo- e iper-gravitarie [8] di locomozione umana, sia di tipo biomeccanico che metabolico, sono tra di loro equivalenti se espressi in termini di  $Fr$  [9]. Oggi che il primo atterraggio su Marte (0.38g) si prefigura, possiamo anticipare che la caratteristica velocità ottimale di cammino e quella di transizione con la corsa avverranno, per mantenere  $Fr$  costante e uguale a 0.25 e 0.5, rispettivamente, a velocità pari al 62% ( $=\sqrt{0.4}$ ) di quelle Terrestri, e cioè a 3.4 e 4.7 km/h [9]. Queste sono prime stime approssimative, che potrebbero essere raffinate dall'incorporare variazioni di momento d'inerzia corporea e di massa aggiunta come abbigliamento spaziale e altre attrezzature 'indossabili'.

Abbiamo parlato del numero di Froude come strumento per considerare 1) gli effetti della taglia sulla velocità del cammino, a parità di gravità, e 2) gli effetti della gravità sulla velocità, a parità di dimensioni corporee. E' chiaro che si può anche uscire da questo schema a sfondo didascalico, e pensare che  $Fr$  possa servire a trovare le velocità dinamicamente equivalenti quando sia la gravità che la taglia possano variare, come avverrà per gli esploratori di differenti esopianeti.

Un ultimo commento in questa sezione riguarda andature diverse dal cammino e dalla corsa, ad esempio il citato 'skipping', che in virtù di un paradigma meccanico che incorpora anche trasferimenti di energia di tipo pendolare [3], può avvalersi della capacità di standardizzazione della velocità, e soprattutto di quella delle transizioni con cammino e corsa, introdotte dal numero di Froude.

#### 4. EVIDENZE DALLE ESPLORAZIONI LUNARI

Il programma Google Earth (Google LLC, USA), oltre a permettere esplorazioni virtuali dettagliate in 3D della superficie terrestre, contiene

una grande varietà di informazioni collegate al nostro satellite e alle missioni Apollo che negli anni '60 dello scorso secolo sono avvenute, con preciso riferimento alle zone lunari interessate. E' così possibile, per la ricchezza, varietà e risoluzione dei video e delle fotografie riprese in quelle occasioni e messe oggi a disposizione dal software, avere testimonianza anche delle limitazioni alla locomozione che l'ambiente ipogravitario, l'orografia e il particolare terreno polveroso (coperto da uno spesso strato di regoliti) imponevano agli astronauti. Un numero cospicuo di riprese video infatti mostra come non fosse affatto semplice provare a camminare in modo 'classico', se non a bassa velocità, come previsto dal numero di Froude. Dopo una fase di familiarizzazione, i componenti delle missioni hanno riscoperto lo skipping, particolarmente utile in piano, mentre per le discese veniva usato l'hopping, andatura a salti con piedi uniti, e comunque raramente accennavano a correre. Una tale situazione di locomotoria era stata in parte prevista negli anni immediatamente precedenti alle missioni Apollo dagli studi dei Professori Rodolfo Margaria e Giovanni Cavagna dell'Università degli Studi di Milano, che avevano pronosticato le difficoltà del cammino e il ricorso ai salti 'a balzelloni' [8].

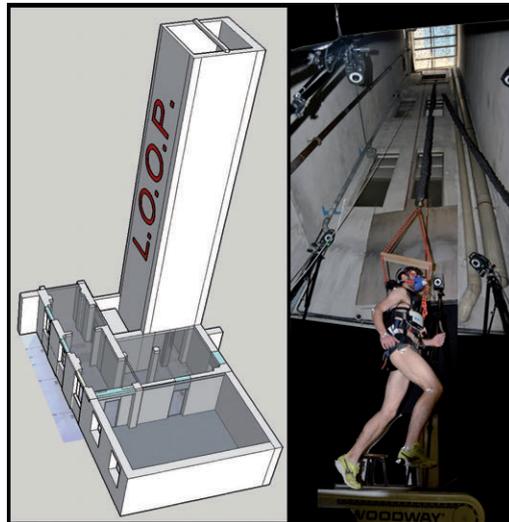
## 5. ESPERIMENTI EMULATIVI: IL CAVEDIO IPOGRAVITARIO MILANESE

Gli esperimenti milanesi si basavano sull'uso di un alto cavedio dell'Istituto di Fisiologia, dove erano state installate lunghe bande elastiche che, connesse ad una imbragatura e pretensionate opportunamente, sgravavano il peso corporeo in modo tale da emulare la gravità lunare. I soggetti eseguivano serie di salti in verticale e la loro forza di reazione al terreno veniva registrata da una piattaforma dinamometrica.

Questo 'cavedio ipogravitario' è stato restaurato, messo in opera nuovamente alcuni anni fa ed equipaggiato con strumentazioni più complete e aggiornate (si veda *Fig. 1*), avendo incluso anche un nastro trasportatore che consente studi locomotori e un sistema di analisi 3D del movimento corporeo che utilizza 10 telecamere e marcatori riflettenti posizionati sui principali giunti articolari e segmenti scheletrici. E' stato così possibile espandere le conoscenze delle differenti andature in ipogravità di diversa entità, sia dal punto di vista biomeccanico che da quello metabolico, misurando anche il dispendio energetico con un metabografo dedicato all'analisi dei gas espirati respiro-per-respiro [10,

11, 12]. I risultati finora prodotti sono sintetizzati nella *Fig. 2*. La chiave di lettura più sintetica possibile della figura è la seguente. Al limite destro (Terra) possiamo notare che le andature ottimali terrestri sono il cammino (W), per velocità fino a quasi 2 m/s (7 Km/h), e la corsa (R) a velocità superiori (Skipping e Balzi sono molto più costosi). Muovendoci verso il limite a sinistra (Luna) l'ambito delle velocità praticabili del cammino si riduce considerevolmente, inizialmente a vantaggio della corsa, ma verso la fine del percorso notiamo che si affacciano altre forme di locomozione metabolicamente più economiche, e biomeccanicamente più utilizzabili, come lo skipping (S) e i balzi a piedi uniti (H), che alla gravità lunare finiscono per soppiantare la corsa. A gravità marziana ci si aspetta che siano ancora fattibili cammino, corsa e skipping (come riportato, forse per l'intervento di aggiornati consulenti, in recenti film di fantascienza, *e.g.* [13]) mentre l'andatura a balzi sarebbe ancora troppo costosa. La curva a tratto spesso che attraversa il grafico costituisce la velocità teorica di transizione tra cammino e corsa alle differenti ipo-gravità, come suggerita dal criterio di similarità dinamica ( $Fr = 0.5$ , dall'equazione sopra riportata si può ricavare che la curva è un arco di parabola invertita). Sulla Luna è necessario passare dal cammino alle andature rimbalzanti a velocità così bassa da fare adottare quasi in modo esclusivo queste ultime (skipping e balzi) al fine di ottenere una locomozione spedita.

*Fig. 1. A sinistra, planimetria 3D del Cavedio ipo gravitario dell'Università di Milano che, agli effetti dell'accreditamento ESA, si chiamerà LOOP (Locomotion On Other Planets Analogue). A destra un soggetto corre mentre l'imbragatura, tramite i lunghi elastici pre-tensionati, rimuove l'83% del suo peso, emulando la forza peso lunare. Si può notare il nastro trasportatore, la maschera del metabografo per le misure di costo energetico, e le telecamere per l'analisi biomeccanica del movimento.*



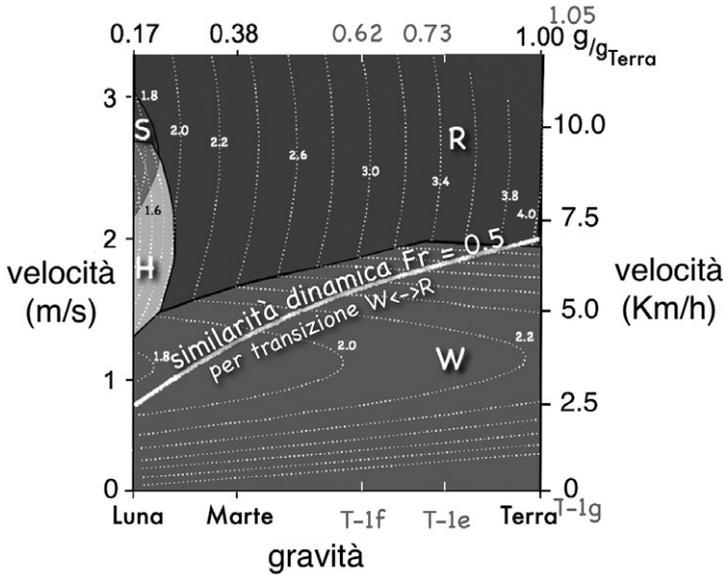


Fig. 2. In ascissa l'accelerazione di gravità: valori (relativi alla gravità terrestre) riportati in alto, corpi celesti corrispondenti sull'asse inferiore (T-1f, T-1, e T-1g si riferiscono agli esopianeti Trappist recentemente scoperti). In ordinata è riportata la velocità di progressione. Nel grafico i simboli sono: W – cammino, R – corsa, S – skipping, H – balzi o hopping (le curve nere delimitano le zone locomotorie delle andature metabolicamente ottimali ottenute da esperimenti emulativi nel cavedio ipogravitario [12]). I numeri all'interno del grafico sono i valori di costo metabolico della locomozione (in J/(kg m)) di alcune curve iso-valore (puntinate bianche) nelle zone riguardanti le diverse andature. La curva bianca rappresenta  $Fr = 0.5$ , cioè le combinazioni velocità/gravità dove per la teoria della Similarità Dinamica [4] dobbiamo aspettarci la velocità di transizione tra il cammino e la corsa, alle differenti gravità. Il grafico è adattato da [12].

Tutte queste considerazioni sull'adattamento locomotorio dei bipedi (umani e non) a campi gravitazionali differenti si applicherebbero, per analogia dei paradigmi biomeccanici, ad animali quadrupedi: un cane-gatto-cavallo sulla Luna, ad esempio, si troverebbe spontaneamente a limitare/eliminare il trotto (analogo della corsa) e soprattutto a galoppare (l'analogo dello skipping), iniziando già dalle basse velocità.

Ultima considerazione riguarda il dispendio energetico: i dati hanno mostrato che se sulla Terra il costo metabolico del cammino è il più basso, seguito dalla corsa ( $\approx \times 2$ ), dallo skipping ( $\approx \times 3$ ) e dai balzi ( $\approx \times 10$ ),

a gravità lunare le tre andature riportano costi energetici pressoché identici. Questo risultato sembra indicare che un determinante cruciale del costo della locomozione sia il contrasto muscolare al vettore gravitatorio, e potrebbe aiutare a spiegare alcuni aspetti ancora oscuri particolarmente delle andature rimbalzanti come la corsa sulla Terra.

Il cavedio ipogravitario dell'Università di Milano è al momento oggetto di ulteriori rinnovamenti e ampliamenti in vista dell'accREDITAMENTO come 'Ground Based Facility' della European Space Agency, che lo aprirà a progetti multicentrici di ricerca internazionale.

## 6. PROSPETTIVE E CONCLUSIONI

Nonostante che gli adattamenti locomotori a condizioni di gravità differenti da quella terrestre siano stati in parte già delineati, ci sono aspetti biomeccanici e neuromotori più fini che devono ancora essere studiati. Da un lato, l'unità muscolo-tendinea deve fronteggiare, in ipogravità, nuove sfide per realizzare la cosiddetta 'power amplification', cioè l'azione combinata di (limitata) attività muscolare e (sostanziale) intervento in accumulo e restituzione di energia elastica da parte del tendine, aspetti investigabili presso strutture come il cavedio con strumentazioni biomeccaniche, elettromiografiche ed ecografiche (per valutare le modificazioni di lunghezza di muscolo e tendine separatamente). Dall'altro, l'evoluzione più a lungo termine delle esplorazioni spaziali implicherà un parallelo e ulteriore sviluppo di attrezzature per la sopravvivenza in condizioni climatiche, termiche e respiratorie che sicuramente interagiranno con gli adattamenti neurobiomeccanici attesi solamente sulla base delle differenti gravità.

## 7. RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia l'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere per avere ospitato nella Sala delle Adunanze la Conferenza del Centro Linceo di Ricerca "Beniamino Segre" che ha tenuto in veste di Professore Distaccato giovedì 29 novembre 2018, e il Prof. Edgardo D'Angelo, per l'introduzione.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Cavagna GA, Margaria R, Mechanics of walking. *J Appl Physiol* 1966: 21: 271-278.
2. Cavagna GA, Saibene F, Margaria R, Mechanical work in running. *J Appl Physiol* 1964: 19: 249-252.
3. Minetti AE, The biomechanics of skipping gaits: a third locomotor paradigm? *Proc R Soc B* 1998: 265: 1227-1235.
4. Alexander RMcN, Optimization and gaits in the locomotion of vertebrates. *Physiol Rev* 1989: 69: 1199-1227.
5. Minetti AE, Saibene F, Ardigò L, Atchou G, Schena F, Ferretti G, Pygmy locomotion. *Eur J Appl Physiol* 1994: 68: 285-290.
6. Minetti AE, Ardigò L, Saibene F, Ferrero S, Sartorio A, Mechanical and metabolic profile of locomotion in adults with childhood-onset GH deficiency. *Eur J Endocr* 2000: 142 (1): 35-41.
7. Saibene F, Minetti AE, Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003: 88: 297-316.
8. Margaria R, Cavagna G, Human locomotion in subgravity. *Aerospace Med* 1964: 35: 1140-1146.
9. Minetti AE, Walking on other planets. *Nature* 2001: 409: 467-469.
10. Minetti AE, Pavei G, Biancardi CM, The energetics and mechanics of level and gradient skipping: preliminary results for a potential gait of choice in low gravity environments. *Planetary and Space Science* 2012: 74: 142-145.
11. Pavei G, Biancardi CM, Minetti AE, Skipping vs. Running as the bipedal gait of choice in hypogravity. *J Appl Physiol* 2015: 119(1): 93-100.
12. Pavei G, Minetti AE, Hopping locomotion at different gravity: metabolism and mechanics in humans. *J Appl Physiol* 2015: 120(10): 1223-1229.
13. 'John Carpenter' film, Walt Disney Pictures, 2012.

