

LA LOCOMOZIONE UMANA A VALORI DI GRAVITA'

DIVERSI DA G.

UN BREVE EXCURSUS STORICO

INTRODUZIONE

Da quando il Presidente degli Stati Uniti d'America, John Fitzgerald Kennedy, durante il discorso pubblico a Huston nel 1962, esplicitò la ferma determinazione degli Stati Uniti a investire tutte le risorse possibili per portare l'Uomo sulla Luna, risultò chiaro al mondo intero che quello che poteva essere vista come un'impresa utopistica, sarebbe diventata reale in breve tempo.



Durante quegli anni, presso l'Istituto di Fisiologia Umana dell'Università di Milano, sotto la guida del professor Rodolfo Margaria, furono poste le basi teoriche per la comprensione della meccanica della locomozione umana; in particolare, Giovanni Cavagna, Franco Saibene e Margaria

analizzarono e descrissero in dettaglio la meccanica della marcia e della corsa sulla base di evidenze sperimentali ottenute durante la locomozione umana sulla Terra ($g = G$) (Cavagna et. al 1963, Cavagna et. al 1964). Poichè tali studi dimostrarono in maniera inequivocabile che la forza di gravità era fondamentale nel determinare la meccanica della

locomozione terrestre, fu naturale da parte dei ricercatori milanesi di cercare di prevedere come la gravità ridotta della Luna (0.16 G) avrebbe potuto modificare la meccanica della locomozione degli astronauti una volta sbarcati sulla Luna (Margaria e Cavagna, 1964).

Margaria e Cavagna conclusero, sulla base di considerazioni teoriche, che la velocità critica alla quale si passa dalla marcia alla corsa fosse più bassa sulla Luna che sulla Terra e che, in condizioni di subgravità (0.16 G), dovesse essere praticamente impossibile correre. Tali considerazioni furono ottenute tramite l'analisi teorica dei dati sperimentali ottenuti a G: esse si dimostrarono valide quando nel luglio del 1969 le immagini provenienti dalla Luna mostrarono che gli astronauti procedevano a balzi, e che la loro modalità di locomozione non era ascrivibile al meccanismo della marcia.

Decenni più tardi, nel 2000, quando è stato possibile riprodurre gli esperimenti di locomozione sui voli parabolici a valori di g diversi da G , sono state verificate le conclusioni teoriche alle quali si era giunti negli anni '60 ed è stato possibile creare un modello sperimentale che possa prevedere la locomozione in subgravità.

E' stato possibile prevedere che su Marte (0.4 g), la velocità di marcia ottimale sarà 3.7 km h⁻¹

PREMESSE TEORICHE

Le forze che agiscono nella locomozione sono: *a*) quelle inerziali dovute al cambiamento della quantità di moto del sistema rispetto all'ambiente circostante e *b*) il peso del corpo P che è costante. La resistenza del vento è molto piccola a tutte le velocità di marcia, e quindi può essere trascurata.

Il peso corporeo è determinato dalla massa e dall'accelerazione di gravità G : $P = m \cdot G$: la meccanica della locomozione è influenzata in modo diverso se una data variazione di P è dovuta ad una variazione di m o di G . Infatti, per un dato valore di G , la meccanica della locomozione di un soggetto di 35 kg è sostanzialmente uguale a quella di un soggetto di 70 kg, cioè di una massa M doppia, l'unica differenza è il valore delle forze, sia inerziali che gravitazionali, agenti durante un ciclo di passi. Il soggetto di 70 kg a $g = 0.5 G$ pesa 35 kg, ma in questa condizione la sua meccanica di locomozione sarà molto diversa da quella del soggetto di 35 kg a G . L'importanza del valore di g nella locomozione è evidente considerando che l'abbassamento del centro di gravità del corpo, che avviene sia nella marcia che nella corsa nella seconda fase del passo, dipende solo dall'accelerazione di gravità ed è indipendente da M ; dall'altro lato un cambiamento di M implica cambiamenti proporzionali sia di P che delle forze inerziali responsabili dei cambiamenti di velocità, mentre un cambiamento di g si riflette solo su un cambiamento del peso corporeo P , mentre le forze inerziali non sono influenzate. Il cambiamento dell'importanza relativa del peso corporeo e delle forze inerziali è uno dei principali fattori responsabili del cambiamento della meccanica della locomozione a $g \neq G$. Se, per ipotesi $g = 0$, e quindi $P = 0$, condizione che si incontra nello spazio interplanetario, e/o nel volo parabolico di breve durata, la locomozione non sarà possibile.

Metodi per studiare la locomozione a $g \neq G$. La meccanica della locomozione umana a valori diversi da G in può essere analizzata:

- studiando sperimentalmente la locomozione umana durante i voli parabolici.
- attraverso modelli che analizzano quantitativamente la meccanica della locomozione a G ed estrapolando poi i dati a $g \neq G$, per prevedere i possibili cambiamenti della meccanica della locomozione in subgravità.

- simulando in laboratorio la $g \neq G$: per esempio è possibile simulare la subgravità applicando al soggetto una forza opposta al peso corporeo: questa può essere ottenuta sostenendo il soggetto per mezzo di molle o palloncini riempiti di gas leggeri, o per immersione in acqua; in quest'ultimo caso la condizione di subgravità può essere simulata in modo soddisfacente, ma viene introdotto un nuovo fattore, cioè la resistenza alla progressione dovuta all'alta viscosità dell'ambiente circostante: perciò, la locomozione in immersione è sensibilmente diversa dalla locomozione in un mezzo gassoso o nel vuoto. La sospensione del corpo con molle o palloni, simula la condizione di subgravità solo parzialmente perché le forze non possono essere applicate al centro di gravità del corpo e devono essere applicate a uno o più punti del tronco. Durante il ciclo del passo, il baricentro si sposta all'interno del tronco: quindi se la linea che collega il centro di gravità del corpo (*COM*) con il punto di applicazione della risultante delle forze che agiscono in opposizione al peso corporeo non è verticale, si forma una coppia che tende a mettere il soggetto fuori equilibrio; inoltre diventa tecnicamente molto difficile applicare queste forze in modo uniforme a tutto il corpo, in particolare agli arti, che durante la locomozione sono soggetti a spostamenti relativamente indipendenti dal tronco.

In questa tesi, si riportano i primi studi basati su modelli teorici elaborati da Margaria e Cavagna nel 1964, poi ripresi da una nota tecnica della NASA del 1966, che prevedono con ottima precisione la locomozione umana in subgravità. Tali dati teorici sono stati in seguito verificati durante esperimenti condotti a bordo di voli parabolici eseguiti nel 1998 dalla ESA da Cavagna (Cavagna et al. 2000, 2005)

STUDI TEORICI DURANTE GLI ANNI 60'

Durante gli anni '60, era difficile poter riprodurre la locomozione umana su di un volo parabolico, quindi Margaria e Cavagna utilizzarono i dati sperimentali ottenuti presso il laboratorio dell'Università di Milano per prevedere la meccanica della locomozione sulla Luna.

Risulta quindi necessario dapprima descrivere i principi della meccanica della locomozione umana sulla Terra.

Lavoro meccanico esterno durante la marcia e la corsa a G. La locomozione su terra



prevede che, nonostante il soggetto abbia una velocità media di progressione rispetto al suolo v_f in media costante, ad ogni passo l'arto a contatto col suolo ha una velocità zero rispetto al suolo stesso; in altre parole, sia che si cammini a bassa velocità, sia che si corra alla massima velocità possibile, ad

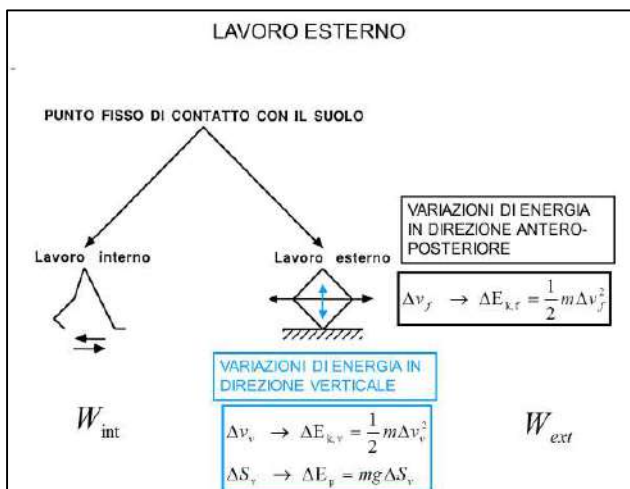
ogni passo esiste un istante nel quale il piede è fermo al suolo. Inoltre, a differenza del rotolamento di una ruota, dove il vettore che unisce il centro della ruota con il suolo (vettore del vincolo) è perpendicolare al vettore v_f , nella locomozione su terra l'angolo fra il vettore vincolo e il vettore $v_f \neq 90^\circ$.

La meccanica della locomozione umana è determinata dalla presenza del vincolo in quanto:

- quando ad ogni passo il piede viene portato verso l'avanti e appoggiato al suolo, esso determina una frenata verso l'avanti poiché il vettore del vincolo non è perpendicolare al vettore v_f . Poiché, come detto, il COM ha una velocità in media

costante v_f , successivamente alla frenata è necessaria una spesa energetica per riaccelerare il *COM*.

- quando ad ogni passo il piede viene portato verso l'avanti e appoggiato al suolo, determina, soprattutto nella marcia, uno spostamento verticale del *COM*.

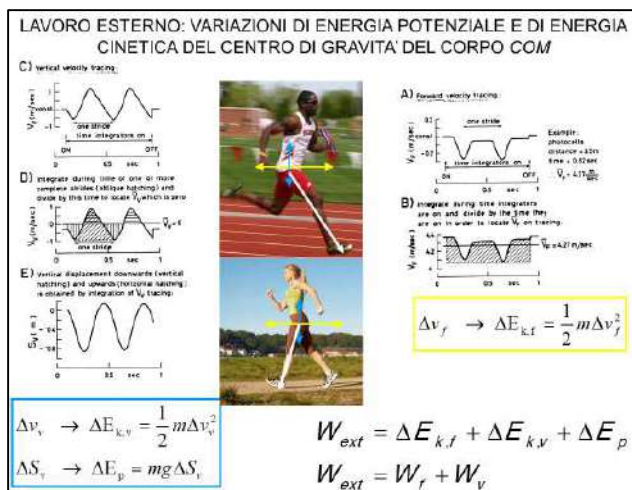


Nella locomozione terrestre, quando il piede viene portato verso l'avanti e appoggiato al suolo, determina una frenata verso l'avanti. Poiché il *COM* ha una velocità media costante v_f , successivamente alla frenata è necessaria una spesa energetica per riaccelerare il *COM*. Inoltre quando il piede

viene appoggiato al suolo in avanti, determina, soprattutto nella marcia, uno spostamento verticale del *COM*: quindi, il vincolo determina una continua variazione di energia cinetica frontale $\Delta E_{kf} = \frac{1}{2} m \Delta v_f^2$ conseguente alla continua frenata-accelerazione antero-posteriore del *COM* e una continua variazione di energia cinetica verticale $\Delta E_{kv} = \frac{1}{2} m \Delta v_v^2$ e gravitazionale $\Delta E_p = mg \Delta S_v$ conseguente al continuo spostamento verticale S_v del *COM*. Nella locomozione terrestre ΔE_{kf} , ΔE_{kv} e ΔE_p sono le componenti più importanti e determinanti il lavoro esterno W_{EXT} , cioè l'energia che deve essere spesa verso l'esterno (in questo caso contro il campo gravitazionale) per mantenere la locomozione. Poiché la locomozione su terra avviene a velocità ridotta, è lecito trascurare nel computo del W_{EXT} l'attrito aereodinamico; inoltre poiché gli spostamenti del *COM* sul piano frontale sono praticamente nulli, è lecito non calcolarli nel computo del W_{EXT} .

Per misurare correttamente W_{EXT} è necessario misurare i valori di E_{kf} , E_{kv} , E_p che il *COM* assume in ogni istante del passo. Nei primi anni '60, Cavagna e Saibene e Margaria analizzarono la meccanica della locomozione umana attraverso l'uso di accelerometri

triassiali integrati con una videocamera. In seguito fu adattata una piattaforma di forze: essa consta di una superficie piana in grado di misurare istantaneamente la forza impressa dal soggetto su di essa, scomponendola in una componente con direzione verticale F_V e una componente in direzione antero-posteriore F_F . Quando il soggetto è fermo, $F_V = m \cdot g$ mentre quando imprime una spinta in direzione verticale $F_V = m \cdot a_v + m \cdot g$. Dividendo tutti i termini per m ($F_V / m = a_v + g$) e azzerando lo strumento quando $F_V / m = g$, risulta che, quando il soggetto è fermo, la piattaforma misura $F_V / m = a_v = 0$ e quando il soggetto imprime una spinta in direzione verticale la piattaforma misura $F_V / m = a_v$ (quando invece



sulla piattaforma non vi è alcun carico, essa misura $F_V / m = a_v = -g$); in tal modo è possibile ottenere i valori istantanei di a_v del COM del soggetto durante il movimento. Tramite un processo di integrazione matematica del segnale istantaneo della a_v del COM del soggetto (vedi sotto), è

possibile calcolare i valori istantanei di velocità verticale v_v e di spostamento verticale S_v del COM del soggetto durante il movimento ed ottenere i valori istantanei di $E_{kv} = \frac{1}{2} m v_v^2$ ed $E_p = mg S_v$: la somma delle variazioni di E_{kv} ed di E_p determinano il lavoro che è necessario compiere per mantenere la locomozione, analizzato in direzione verticale $W_{EXT,V} = \Delta E_{kv} + \Delta E_p$. Analogamente, la misura istantanea di a_f permette di ottenere i valori istantanei di $E_{kf} = \frac{1}{2} m v_f^2$ e calcolare il lavoro necessario per mantenere la locomozione, analizzato in direzione antero-posteriore $W_{EXT,F} = \Delta E_{kf}$.

La somma di $W_{EXT,V} = \Delta E_{kv} + \Delta E_p$ e di $W_{EXT,F} = \Delta E_{kf}$ corrisponde a W_{EXT}

$$W_{EXT} = W_{EXT,F} + W_{EXT,V}$$

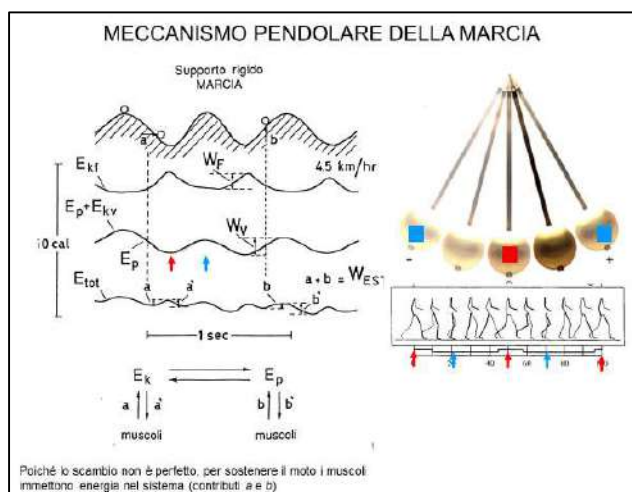
L'integrazione matematica delle misure istantanee di a_v e di a_f del *COM* ottenute dalla piattaforma di forze durante la locomozione, permette di calcolare i valori istantanei di v_v e di v_f del *COM* all'interno di ogni passo applicando gli integrali definiti:

$$v_v = \int_0^2 a_v dt + \text{cost} \quad v_f = \int_0^2 a_f dt + \text{cost}$$

Le costanti di integrazione, cioè i valori di v alle quale sommare le variazioni di v calcolate dall'integrale sono

- $v_v = 0$ per le variazioni di velocità verticale, in quanto le Δv_v del *COM* in ogni passo devono essere calcolate dallo stato di quiete (ortostatismo), quando il *COM* è fermo.

$v_f = \bar{v}_f$ per le variazioni di velocità antero-posteriore, in quanto le Δv_f del *COM* in ogni passo devono essere calcolate rispetto al valore di velocità media del *COM* durante la locomozione \bar{v}_f



Durante la marcia, il piede che ad ogni passo viene portato verso l'avanti e appoggiato al suolo, determina una frenata ($-a_f$); successivamente alla frenata è necessaria una riaccelerazione ($+a_f$) del *COM* per mantenere \bar{v}_f costante: la misura di codeste variazioni di a_f , misurate con la

piattaforma di forze, permette di quantificare l'energia cinetica del *COM* in direzione anteroposteriore, è rappresentata dalla prima traccia simil sinusoidale E_{kf} nella figura MECCANISMO PENDOLARE DELLA MARCIA. L'appoggio del piede (il già definito vincolo), determina anche lo spostamento del *COM* in direzione verticale quindi delle variazioni dell'energia cinetica verticale e potenziale ($E_p + E_{kv}$) del *COM*, rappresentate dalla seconda traccia simil sinusoidale ($E_p + E_{kv}$) della figura. Come chiaramente mostrato

dalle due tracce sperimentali, la frenata in avanti (diminuzione di E_{kf}) e il sollevamento del *COM* (aumento di $(E_p + E_{kv})$) sono contemporanee, cioè l'appoggio dell'arto inferiore esteso e rigido determina che buona parte dell'energia cinetica (anteroposteriore) del *COM* venga trasformata in energia potenziale E_p , cioè in sollevamento del *COM*; analogamente, nella fase immediatamente successiva del passo, la “caduta in avanti” permette di ritrasformare la E_p in E_{kf} , cioè di riaccelerare il *COM* per mantenere la \bar{v}_f costante. La continua trasformazione di E_p in E_{kf} e, viceversa, di E_{kf} in E_p fa sì che l'energia totale del *COM* resti pressochè costante ($E_{tot} = E_{kf} + E_{kv} + E_p$, terza traccia nella figura), e che quindi il lavoro muscolare/metabolico necessario per mantenere il moto del *COM* durante la marcia (W_{EXT} rappresentato dagli incrementi a e b della traccia E_{tot}) sia minimo, molto minore della semplice somma algebrica dell'energia meccanica necessaria per mantenere il moto nelle due direzioni analizzate ($W_{EXT} \ll W_F + W_V$).

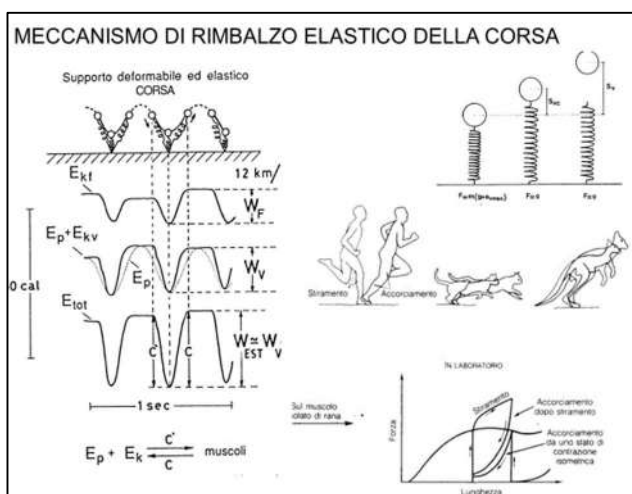
Il meccanismo della marcia può essere descritto in maniera didatticamente utile utilizzando due esempi:

- il moto di una pallina che rotola su di un percorso ondulato: l'energia cinetica acquistata durante la discesa permette di superare il successivo dosso e l'energia potenziale acquistata al culmine del dosso permette di iniziare la caduta (disegno in nella figura).
- il moto di un pendolo: il pendolo, durante la sua oscillazione, trasforma continuamente la E_{kf} (massima quando il pendolo si trova perpendicolare al suolo, punto rosso slide di dx) in E_p (massima quando il pendolo inverte il moto, punti blu della figura) e viceversa.

In entrambi gli esempi, a meno di attriti che dissipano energia, il moto della pallina e del pendolo sono perpetui e quindi nessun lavoro deve essere immesso nel sistema per mantenerne il moto. Al contrario nella marcia, poiché il meccanismo di scambio fra i E_p in

E_{kf} e, viceversa, di E_{kf} in E_p non è perfetto, per mantenere il moto è necessario che i muscoli immettano (poco) lavoro ad ogni passo per completare lo scambio. Il lavoro immesso dai muscoli è rappresentato dagli incrementi a e b nella traccia E_{tot} . Quindi, quanto è più efficace il processo di trasformazione, quanto meno lavoro devono fornire i muscoli, quanto meno è dispendiosa in termini energetici la marcia.

Poiché le variazioni di E_{kv} sono molto modeste, le variazioni di energia del COM in direzione verticale praticamente coincidono con le variazioni della sola E_p .



Aumentando la velocità di marcia, le forze inerziali, che sono principalmente dirette in avanti, aumentano, e il lavoro necessario per sostenere le variazioni di velocità, $\Delta W_{EXT,F}$ aumenta in modo corrispondente. Ovviamente il lavoro fatto contro la gravità $\Delta W_{EXT,V}$ non può aumentare indefinitamente,

ma ha dei limiti dovuti alle condizioni anatomiche del soggetto, in particolare degli arti, che limitano l'elevazione massima del COM. Se $\Delta W_{EXT,F}$ tende ad aumentare al di sopra E_p immagazzinata durante il sollevamento del COM, quest'ultima non sarà più sufficiente per provvedere alla spinta in avanti. Questa sarà quindi sostenuta direttamente da una vera e propria componente frontale della spinta. Poiché questa ha necessariamente anche una componente verticale, i livelli di energia cinetica e potenziale del corpo aumenteranno allo stesso tempo. Questo è ciò che in effetti avviene nella corsa, quando le curve E_p e E_{kv} nel ciclo del passo sono sostanzialmente in fase (vedi figura MECCANISMO DI RIMBALZO ELASTICO DELLA CORSA): questa è la sostanziale differenza rispetto alla marcia, durante la quale le curve di E_p e E_{kv} sono in opposizione di fase. Il passaggio dalla marcia alla corsa avviene ad un valore di velocità di circa 8 km h, al quale E_p accumulata durante il

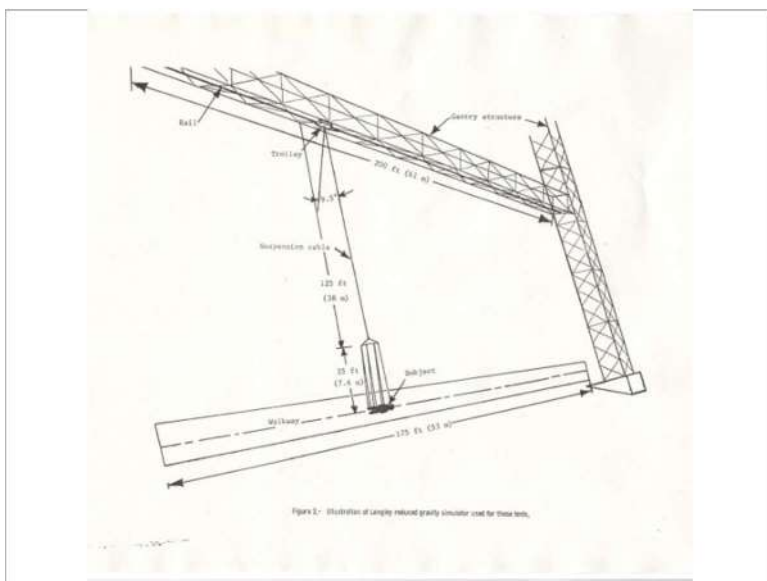
sollevamento del corpo, è circa uguale alle $\Delta W_{\text{EXT,F}}$, necessarie per sostenere le variazioni di velocità in avanti nel ciclo del passo.

La marcia sulla Luna. Sulla base delle evidenze scientifiche descritte, Margaria e Cavagna valutarono che durante la marcia sulla Luna il lavoro fatto contro la gravità W_v sarebbe stato ovviamente minore rispetto che sulla Terra: corrispondentemente l'energia potenziale disponibile E_p per accelerare il corpo in avanti sarebbe stata minore e la transizione fra la marcia e la corsa sarebbe avvenuto ad un valore di velocità inferiore.

Sulla superficie lunare (dove $g = 0.16 G$) la curva W_v è appiattita e il valore di $\Delta W_{\text{EXT,V}}$ è ridotto a 0.16 del valore sulla Terra: in queste condizioni E_p non è sufficiente a rendere conto delle variazioni di $\Delta W_{\text{EXT,F}}$ che sono dovute solo a forze inerziali e non sono influenzate da una variazione di g . La continua trasformazione di E_p in E_{kv} e viceversa, caratteristica fondamentale del meccanismo pendolare della marcia, non è quindi possibile sulla superficie lunare, se non ad una velocità di progressione inferiore a 1 km h^{-1} . Quindi nel 1964, Margaria e Cavagna conclusero che camminare sulla superficie lunare fosse quasi impossibile, e che la locomozione fosse possibile solo attraverso una meccanica simile a quella della corsa. Conclusero inoltre che, in subgravità uno dei fattori maggiormente responsabili del cambiamento della meccanica della locomozione è il cambiamento del rapporto tra forza inerziale e gravitazionale, o, in altre parole, tra livello di energia cinetica e potenziale del corpo.

Due anni più tardi, nel 1966, apparve una nota tecnica prodotta dalla NASA che analizzava la meccanica della locomozione in subgravità. Gli autori, per simulare la gravità lunare, utilizzarono una struttura costituita da una serie di cavi collegati a un carrello aereo libero di muoversi lungo una pista parallela a una passerella su cui il soggetto sta in piedi e si

muove. Il soggetto era libero di camminare, correre, saltare, lungo una passerella lunga 53 m e una videocamera riprendeva il soggetto. La meccanica della locomozione veniva quindi analizzata con misure cinematiche, relative al movimento del corpo e degli arti, e non con misure dinamiche, relative alle forze inerziali e gravitazionali come dagli autori milanesi. Inoltre, come già discusso da Margaria e Cavagna, la sospensione del corpo con può determinare che durante il ciclo del passo, il baricentro si sposti all'interno del tronco.



Gli Autori della NASA conclusero che la velocità media di transizione dalla marcia alla corsa sul suolo lunare fosse circa 5.4 km h^{-1} , valore in chiaro disaccordo con quello teorizzato da Margaria e Cavagna. La differenza può essere spiegata in relazione al metodo

utilizzato per discriminare fra marcia e corsa. Come detto, secondo gli studi di Cavagna, Saibene e Margaria, la differenza sostanziale fra la meccanica della marcia e la meccanica della corsa è data dal fatto che, durante la marcia le curve E_p e E_{kv} nel ciclo del passo sono in opposizione di fase mentre durante la corsa le curve di E_p e E_{kv} sono in accordo di fase. Quindi il punto di passaggio dalla marcia alla corsa viene valutato dagli autori milanesi sulla base di tale dato. Gli autori statunitensi, al contrario, distinguono fra la marcia e la corsa in base al fatto se entrambi i piedi sono a contatto con il suolo o se entrambi i piedi sono sollevati dal terreno durante il passo. Quindi è possibile che durante gli esperimenti condotti alla NASA, i soggetti potessero mantenere una andatura apparentemente di

marcia (perché non avevano una reale fase di volo) ma che in realtà era determinata da un andamento delle curve E_p e E_{kv} in accordo di fase, tipica della corsa.

I filmati di ritorno dal suolo Lunare del 20 luglio 1969 dimostrarono inequivocabilmente che la modalità di locomozione degli astronauti Neil Armstrong e Buzz Aldrin non possedeva le caratteristiche meccaniche della marcia, ma sembrava piuttosto una progressione a balzi: in altre parole, le previsioni teoriche di Margaria e Cavagna furono corrette.

La corsa sulla Luna. Poiché si concluse che camminare sulla Luna fosse praticamente impossibile, Margaria e Cavagna analizzarono la meccanica della corsa in subgravità. Si è detto sopra che nella corsa l'energia cinetica e quella potenziale del corpo sono sostanzialmente in fase, aumentando entrambe all'inizio del passo, come conseguenza della spinta muscolare. Questa spinta, quando $g = G$, è diretta in avanti e verso l'alto con un angolo rispetto all'orizzontale di circa $75^\circ - 85^\circ$. L'angolo formato dalla direzione di spinta con l'orizzontale è quindi minore quanto maggiore è la velocità, diminuendo da 85° a 10 km h^{-1} a 75° a 20 km h^{-1} . In subgravità la componente verticale della spinta sarà ridotta proporzionalmente alla riduzione dell'accelerazione di gravità, mentre la componente frontale della spinta invece, in funzione delle forze inerziali, per un dato valore di velocità, dovrebbe essere la stessa esercitata a G . La diminuzione della componente verticale della spinta, per una data componente frontale, implica una diminuzione dell'angolo. Sulla base di considerazioni teoriche, gli Autori conclusero che molto probabilmente il limite inferiore di questo angolo non può essere inferiore a 45° , al di sotto del quale si perderebbe l'attrito del piede con il suolo con una conseguente scivolata. Correndo sulla superficie lunare in condizioni di subgravità, la componente verticale della spinta sarà corrispondentemente ridotta mentre la componente anteriore della spinta è, per un dato valore di velocità, la stessa che sulla Terra. l'angolo calcolato risulta essere di circa 52° , correndo a 10 km h^{-1} ,

32° a 20 km h⁻¹. Quindi velocità di corsa maggiori di 13 km h⁻¹ non possono essere raggiunte sulla luna. Velocità più elevate possono essere raggiunte solo attraverso un meccanismo di progressione diverso dalla corsa, che comporta un apprezzabile sollevamento del centro di gravità rispetto al livello normale.

STUDI SPERIMENTALI SUI VOLI PARABOLICI



Ala fine del secolo scorso, è stato possibile riprodurre gli esperimenti di meccanica della marcia a bordo dei velivoli adibiti dall'ESA per l'effettuazione dei voli parabolici.

Gli esperimenti furono condotti da Cavagna, Patrick Willems e Norman Heglund durante

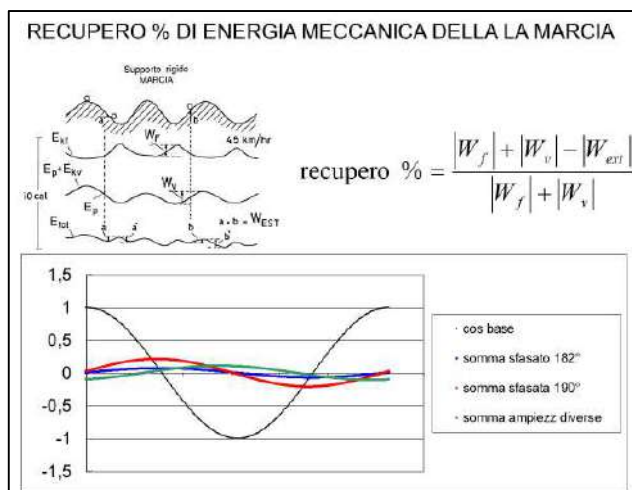
la 23a e 24a campagna di volo parabolico dell'Agenzia Spaziale Europea. L'effetto di diversi valori di g è stato studiato durante la marcia su una piattaforma di forza fissata al pavimento dell'aereo (un KC-135 e un Airbus A300) durante vari profili di volo parabolico durante i quali sono state raggiunti valori stabili di gravità simulata di 0.4 e 1.5 g.

La gravità gioca un ruolo essenziale nella locomozione terrestre. A causa della gravità, è necessario un lavoro ad ogni passo per sollevare il corpo anche quando ci si muove su una superficie piana. La gravità e l'azione frenante del terreno interagiscono durante la locomozione con due diverse strategie di conservazione dell'energia: il meccanismo pendolare della marcia, fino a velocità intermedie, e il meccanismo di rimbalzo della corsa, fino alle più alte velocità raggiungibili. In entrambi i casi il corpo subisce una decelerazione in avanti ad ogni passo a causa del vincolo tra il centro di massa del corpo (COM) e il punto di contatto del piede sul terreno. Questa decelerazione si traduce in una perdita di energia cinetica E_{kv} .

Durante un passo di marcia, il COM si abbassa durante l'accelerazione in avanti e si alza durante la decelerazione in avanti. Quindi la perdita di energia cinetica può essere trasformata in un aumento di energia potenziale. Di conseguenza, l'energia meccanica è in gran parte conservata durante il cammino attraverso la conversione dell'energia cinetica in

energia potenziale gravitazionale e il successivo recupero dell'energia cinetica dall'energia potenziale. Questo rende il costo energetico metabolico per unità di distanza durante la camminata alla velocità scelta liberamente circa la metà di quello durante la corsa. Trascurando i movimenti laterali la frazione dei cambiamenti di energia meccanica totale del *COM* che viene recuperata dal meccanismo pendolare della marcia è:

$$R (\%) = \frac{|W_f| + |W_v| - |W_{ext}|}{|W_f| + |W_v|}$$



dove W_f è il lavoro positivo fatto ad ogni passo per riaccelerare il *COM*, cioè per ripristinare l'energia cinetica del movimento in avanti e W_v è il lavoro positivo fatto ad ogni passo per aumentare l'energia potenziale (E_p), durante il sollevamento del *COM* e W_{ext} è il lavoro positivo

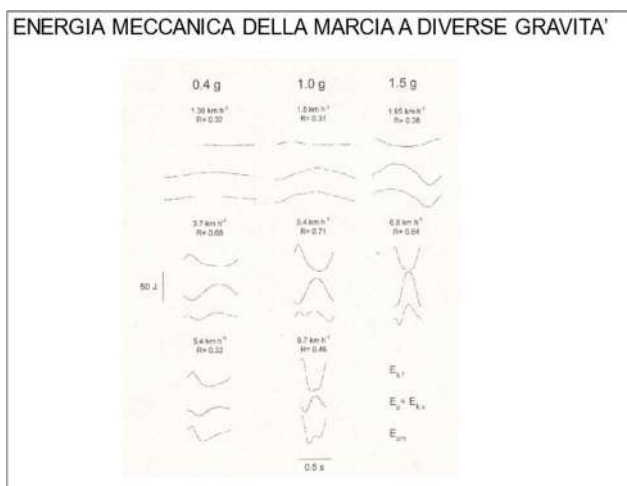
effettivamente fatto ad ogni passo per mantenere il movimento del *COM* nel piano sagittale. W_{ext} è uguale alla somma degli incrementi dell'energia meccanica totale del *COM*, durante un passo. In termini teorici il recupero può essere uguale al 100% (quindi nessun lavoro muscolare deve essere immesso per mantenere il moto) solo se:

- le due curve E_p e E_{kf} hanno forma perfettamente sinusoidale
- le due curve E_p e E_{kf} sono in perfetta opposizione di fase (sono cioè sfasate di 180° o π)
- le due curve E_p e E_{kf} hanno uguale ampiezza.

In tal caso la somma algebrica fra le due funzioni corrisponderebbe ad una linea retta (= 0) coincidente con l'asse orizzontale (vedi figura RECUPERO % DI ENERGIA MECCANICA DELLA MARCIA).

In realtà, nella marcia, le tre condizioni che permettono il 100% di recupero non sono pienamente soddisfatte, quindi il recupero è al massimo 65 % durante la marcia sulla Terra alla velocità ottimale di 5.5 km h⁻¹. A velocità di camminata più lente e più veloci R diminuisce.

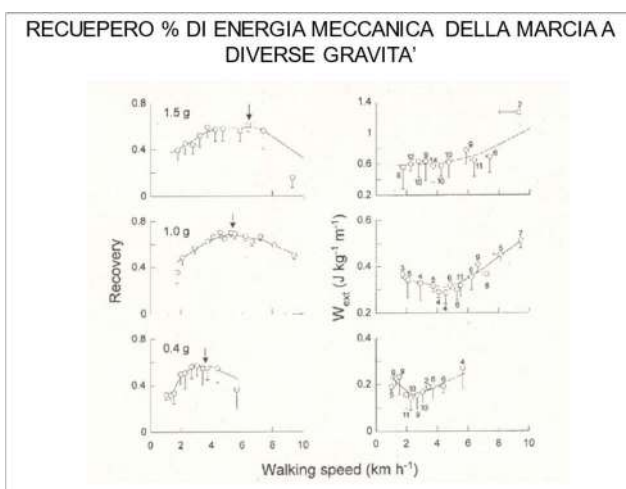
Come detto, per ottimizzare il recupero dell'energia meccanica, le curve $E_{k,f}$ ed E_P devono essere uguali in ampiezza e opposte in fase, come in un pendolo. Un cambiamento di gravità porta a un cambiamento nell'ampiezza della curva E_P , che è proporzionale alla gravità, rispetto alla curva $E_{k,f}$, che non è direttamente influenzata dalla gravità. Ne consegue che per mantenere lo stesso trasferimento pendolare di energia meccanica, dovrebbe avvenire un simile cambiamento di ampiezza della curva $E_{k,f}$. Supponendo che il cambiamento di $E_{k,f}$ all'interno di ogni passo sia una funzione crescente della velocità di camminata, indipendente dalla gravità, è stata proposta l'ipotesi che il meccanismo di scambio di energia simile al pendolo invertito che avviene durante la camminata sarebbe ottimizzato a velocità più basse in condizioni di gravità ridotta.



I cambiamenti di energia meccanica del COM che avvengono durante il passo a velocità di marcia equivalenti (cioè a velocità con recupero R simili) sono mostrati nella figura ENERGIA MECCANICA DELLA MARCIA A DIVERSE GRAVITA' per 0.4, 1.0 e 1.5 G. In ogni pannello della figura, la

traccia superiore mostra l'energia cinetica del moto in avanti del centro di massa ($E_{k,f}$); le tracce centrali mostrano l'energia potenziale gravitazionale (E_P) e la traccia inferiore mostra l'energia meccanica totale del centro di massa ($E_{COM} = E_{k,f} + E_P$). I pannelli superiori mostrano i tracciati ottenuti a basse velocità di camminata dove il recupero (R) è inferiore al massimo. I pannelli centrali mostrano i tracciati ottenuti a velocità in cui R è al massimo. I pannelli inferiori mostrano i tracciati ottenuti in prossimità delle velocità più elevate raggiunte; non è stato possibile ottenere in modo coerente tali tracciati a 1.5 g a causa della lunghezza limitata della pista. Alla velocità per un R massimo, le curve $E_{k,f}$ ed E_P avevano ampiezza simile ed erano quasi in opposizione di fase all'interno di ogni classe di gravità; inoltre, la condizione per un R ottimale si verifica ad una velocità di marcia che aumentava con la gravità.

I dati sperimentali ottenuti a bordo dei voli parabolici confermano quanto affermato da Margaria e Cavagna nel 1964. Viene confermato che in subgravità il meccanismo della marcia può essere riprodotto solo fino a velocità ridotte. I presenti esperimenti, tuttavia, mostrano che i cambiamenti di energia cinetica di fatto diminuiscono con la diminuzione della gravità.



La velocità ottimale di marcia definita come la velocità in cui R raggiunge un valore massimo è più bassa in condizioni di subgravità rispetto alla velocità di marcia ottimale della marcia sulla terra (5.5 km h^{-1}). In particolare, ad una gravità uguale a quella di Marte (0.4 G), la velocità ottimale di marcia

corrisponde a circa 3.7 km h^{-1}