

PRESTAZIONI SU TERRENO ACCIDENTATO DI VEICOLI ESAPODI A TELAI RIGIDI

G. Genta, N. Amati

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, C. Duca degli Abruzzi 24, Torino

SOMMARIO

I veicoli a zampe a telai rigidi sono stati proposti per missioni di esplorazione planetaria e per missioni spaziali commerciali oltre che per applicazioni terrestri. Il loro principale vantaggio è l'ottima mobilità su terreno accidentato, unita ad una notevole semplicità sia della meccanica che del sistema di controllo, che non sono sostanzialmente più complessi di quelli di un veicolo a ruote. Scopo del presente lavoro è lo studio del moto su terreno accidentato di un dimostratore realizzato durante una precedente ricerca, con lo scopo di raffinarne il progetto e di incrementarne le prestazioni.

ABSTRACT

Twin rigid-frames hexapod walking machines are a class of vehicles which have been proposed as microrovers for planetary exploration and exploitation and for ground applications. Their main advantage is the good performance on rough ground with a mechanical and control layout which is not more complicated than that of wheeled vehicles. The aim of the present paper is that of studying the motion on uneven ground of a demonstrator built in a previous research work with the aim of refining its design and improving its performances.

1. INTRODUZIONE

Nel 1997 è iniziata, presso il Laboratorio di Meccatronica del Politecnico di Torino e con la collaborazione dell'Alenia Aerospazio, una ricerca volta alla realizzazione di veicoli automatici di piccole dimensioni (microrovers) per esplorazione planetaria, adatti in particolare a corpi celesti a bassa e bassissima gravità. Tale ricerca ha portato alla realizzazione di un dimostratore, inizialmente designato ALGEN [1] e poi WALKIE 6 (Fig. 1), progettato secondo le specifiche RoSA/M [2] dell'ESA per 'microrover' adatti all'ambiente marziano. Trattandosi di un dimostratore, sono stati usati componenti commerciali, scelti più in base al costo che alla possibilità di spazializzazione.

L'architettura del veicolo si basa su due telai triangolari rigidi, ciascuno dei quali porta tre attuatori a vite azionati da motori elettrici a corrente continua. I telai si

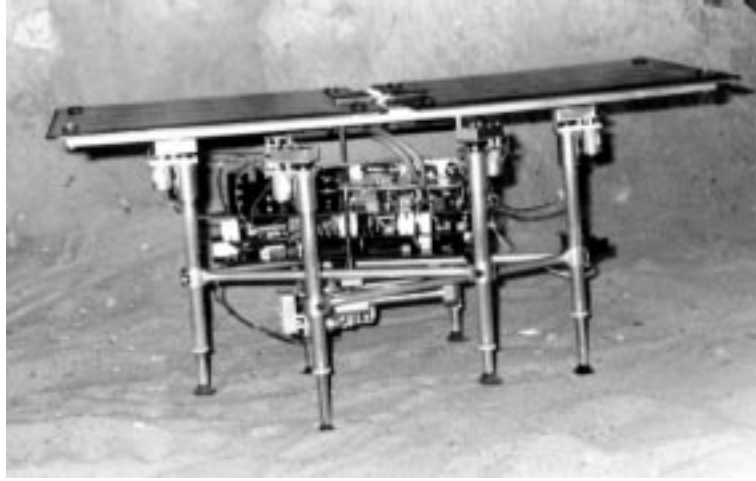


FIGURA 1: WALKIE 6.

possono muovere uno rispetto all'altro in direzione longitudinale grazie ad un accoppiamento prismatico e ad un ulteriore attuatore a vite ed inoltre possono ruotare intorno ad un asse verticale per assicurare il moto di sterzata. Il sistema ha quindi 8 gradi di libertà interni ed è azionato da otto motori elettrici. Veicoli a due telai rigidi sono stati descritti in letteratura, (ad es. [3]), con riferimento a veicoli ad otto zampe, mentre il dimostratore qui studiato è un esapode con andatura a tripode alternato.

La configurazione scelta garantisce un completo disaccoppiamento tra gli spostamenti verticali ed orizzontali delle zampe e la generazione di traiettorie cinematicamente corrette, contribuendo a ridurre i consumi energetici e le sollecitazioni meccaniche. Inoltre l'irreversibilità degli attuatori delle zampe permette di sopportare il peso senza consumare energia. Nella marcia su strada piana le uniche cause di dissipazione di energia sono la necessità di accelerare e di frenare gli organi traslanti e rotanti ad ogni passo, gli attriti tra organi meccanici e le perdite elettriche nei motori e nel sistema di alimentazione. L'energia necessaria ad accelerare le parti in movimento, in primo luogo gli organi rotanti, dipende principalmente dalla velocità di marcia, anche se è pensabile adottare un sistema di recupero dell'energia cinetica. Questa considerazione limita l'applicabilità dei veicoli a telai rigidi a situazioni che richiedano basse velocità, anche se in realtà essi possono essere adottati per velocità maggiori di quelle inizialmente considerate (pochi m/h). D'altra parte i veicoli per esplorazione planetaria, ad eccezione di quelli studiati per le missioni lunari, hanno severi limiti di velocità imposti dalla necessità di controllare il veicolo dalla Terra, che si trova a distanze tali da richiedere tempi di decine di minuti per trasferire qualsiasi informazione o comando dal veicolo al guidatore e viceversa.

Per progettare ed ottimizzare il veicolo sono stati sviluppati due modelli matematici, di differente complessità, in grado di simularne il moto e di calcolare i consumi energetici [4]. Tali modelli sono stati validati sperimentalmente con buoni risultati.

WALKIE 6 ha dimostrato la fattibilità del concetto, raggiungendo prestazioni che

G. Genta, N. Amati

eccedono gli obiettivi del progetto, in particolare per quanto riguarda la velocità su strada piana (circa 20 m/h), la potenza necessaria al moto (meno 2.5 W alla velocità massima sulla Terra, ma circa 0.8 W a velocità ridotta) e soprattutto la capacità di muoversi autonomamente su terreno accidentato e di evitare o superare gli ostacoli.

2. FORZE AL SUOLO

Si consideri un veicolo esapode a due telai rigidi, controllato in modo da mantenere il corpo sempre esattamente orizzontale. Data la bassa velocità di marcia ed i valori trascurabili delle accelerazioni, si assuma che il veicolo sia in condizioni di equilibrio statico in ogni istante. Dato che l'unica andatura possibile per tale veicolo è quella a tripode alternato, per la maggior parte del tempo le zampe in appoggio sono tre, la distribuzione dei carichi verticali al suolo è determinabile mediante sole considerazioni di equilibrio. Al contrario le forze longitudinali e trasversali esercitate dai piedi saranno staticamente indeterminate e dipenderanno principalmente dalle condizioni di aderenza delle varie zampe e dall'affondamento dei piedi nel terreno. La grande variabilità di tali condizioni su terreno accidentato rende quindi praticamente impossibile un calcolo della distribuzione delle forze orizzontali e, per il calcolo strutturale, sarà necessario adottare un approccio conservativo e caricare ciascuna zampa con il carico orizzontale totale.

Nell'utilizzo del veicolo come mezzo di trasporto a bassissima velocità, d'altra parte, le forze orizzontali sono trascurabili anche su strada in pendenza e terreno accidentato; esse divengono rilevanti solo nell'utilizzo del mezzo come macchina operatrice. I due telai che costituiscono il veicolo sono schematizzati in Fig. 2a. Il telaio A, che porta le zampe da 1 a 3, porta anche la guida che permette i moti di avanzamento e di rotazione. Il punto O, traccia dell'asse della cerniera cilindrica posta tra i due telai, può traslare in direzione x ; corrispondentemente la distanza d varia tra un massimo (generalmente minore di a_A), quando il veicolo è in configurazione chiusa, ad un minimo (generalmente maggiore di 0) corrispondente alla configurazione allungata. Per semplicità il secondo telaio è stato rappresentato separatamente in figura. Generalmente il carico utile è posto sul telaio B.

Il passo può essere suddiviso in 6 fasi. A partire dalla configurazione completamente chiusa con tutte le zampe appoggiate. La prima fase consiste nell'innalzamento delle zampe da 4 a 6. Segue la traslazione del telaio B (d diminuisce dal valore massimo al valore minimo), l'abbassamento delle zampe da 4 a 6, l'innalzamento delle zampe da 1 a 3, la traslazione del telaio A (d cresce dal valore minimo al valore massimo) e infine l'abbassamento delle zampe da 1 a 3. In modo analogo anche la rotazione del veicolo può essere scomposta in 6 fasi.

Si supponga che su ciascun telaio gravi la forza verticale F_i ($i = A, B$, positiva verso il basso), pari al peso del telaio, eventualmente sommato ad altre forze verticali quali ad es. quelle esercitate da un penetratore per la raccolta dei campioni, applicata nel punto P_i di coordinate x_i, y_i , oltre ai momenti M_{x_i} e M_{y_i} . Tali momenti possono essere dovuti a varie cause, in particolare a forze esterne o ad errori di orizzontalità dei telai; dato che la distribuzione delle forze orizzontali al suolo è indeterminata, non è possibile definire con esattezza tali momenti nel caso in cui i piedi non giacciono su una superficie orizzontale.

G. Genta, N. Amati

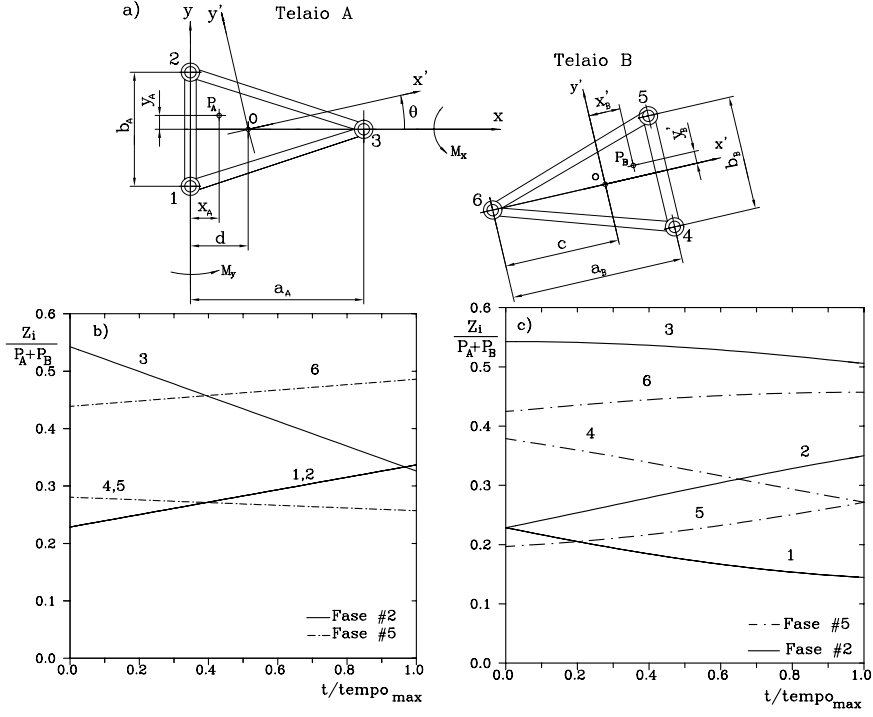


FIGURA 2: (a) Schema dei due telai durante il moto. (b) Andamento delle forze al suolo nel tempo nelle fasi di traslazione (b) e di rotazione (c).

Le forze Z_A agenti sulle zampe da 1 a 3 del telaio A durante la fase 2 valgono:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{array} \right\}_A = [A] \{F\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_A - Y_A) & \frac{1}{2}\gamma_1 & \frac{1}{2a_A\alpha_A} & -\frac{1}{2a_A} \\ \frac{1}{2}(X_A + Y_A) & \frac{1}{2}\gamma_2 & -\frac{1}{2a_A\alpha_A} & -\frac{1}{a_A} \\ X_3 & \gamma_3 & 0 & \frac{M_y}{a_A} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} P_A \\ P_B \\ M_x \\ M_y \end{array} \right\}, \quad (1)$$

dove

$$\begin{aligned} X_A &= 1 - x_A^* & \gamma_1 &= 1 - d^* - x_B^* R_{1B}^+ + y_B^* R_{2B}^- & \alpha_A &= b_A / 2a_A \\ Y_A &= y_A^* / \alpha_A & \gamma_2 &= 1 - d^* - x_B^* R_{1B}^- + y_B^* R_{2B}^+ & d^* &= d / a_A \\ X_3 &= x_A^* & \gamma_3 &= d^* + x_B^* R_4 - y_B^* R_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_i^* &= x_i / a_A & R_{1B}^+ &= \cos(\theta) + \frac{1}{\alpha_A} \sin(\theta) & R_{1B}^- &= \cos(\theta) - \frac{1}{\alpha_A} \sin(\theta) & R_3 &= \sin(\theta) \\ y_i^* &= y_i / a_A & R_{2B}^+ &= \sin(\theta) + \frac{1}{\alpha_A} \cos(\theta) & R_{2B}^- &= \sin(\theta) - \frac{1}{\alpha_A} \cos(\theta) & R_4 &= \cos(\theta) \end{aligned}$$

In modo del tutto analogo, le forze Z_B agenti sulle zampe da 4 a 6 del telaio B durante la fase 5 valgono:

$$\left\{ \begin{array}{c} Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \end{array} \right\}_B = [B] \{F\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\gamma_4 & \frac{1}{2}(X_B - Y_B) & \frac{1}{2} \frac{R_1^+}{a_B \alpha_B} & \frac{1}{2} \frac{R_2^+}{a_B \alpha_B} \\ \frac{1}{2}\gamma_5 & \frac{1}{2}(X_B + Y_B) & \frac{1}{2} \frac{R_1^-}{a_B \alpha_B} & \frac{1}{2} \frac{R_2^+}{a_B \alpha_B} \\ \gamma_6 & X_6 & \frac{R_3}{a_B \alpha_B} & -\frac{R_4}{a_B \alpha_B} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} P_A \\ P_B \\ M_x \\ M_y \end{array} \right\}, \quad (2)$$

dove

$$\begin{aligned} X_B &= \frac{1}{\alpha_B} [\alpha_B (x_B^{**} + c^{**}) - y_B^{**}] & \gamma_4 &= \frac{1}{\alpha_B} [c^{**} \alpha_B + (x_A^{**} - d^{**}) R_{2A}^+ - y_A^{**} R_{1A}^-] \\ Y_B &= \frac{1}{\alpha_B} y_B^{**} & \gamma_5 &= \frac{1}{\alpha_B} [c^{**} \alpha_B + (x_A^{**} - d^{**}) R_{2A}^- + y_A^{**} R_{1A}^+] \\ X_6 &= 1 - (x_B^{**} + c^{**}) & \gamma_6 &= 1 - c^{**} - (x_A^{**} + d^{**}) R_4 + y_A^{**} R_3 \end{aligned}$$

I parametri che compaiono nella matrice B sono adimensionalizzati usando α_B , mentre i termini legati alla posizione angolare relativa dei due telai sono

$$\begin{aligned} R_{2A}^+ &= \alpha_B \cos(\theta) + \sin(\theta) & R_{2A}^- &= \alpha_B \cos(\theta) - \sin(\theta) \\ R_{1A}^- &= \cos(\theta) - \alpha_B \sin(\theta) & R_{1A}^+ &= \cos \theta + \alpha_B \sin(\theta) \end{aligned}$$

L'andamento delle forze al suolo per il dimostratore WALKIE 6 [4], nel caso in cui si consideri solo il peso del veicolo ($x_A = 0.15a_A$, $y_A = 0$, $x_B = 0.13a_B$, $y_B = 0$) durante un passo è riportato in Figura 2(b) e (c). Dato che tali forze non si annullano in nessuna condizione la stabilità del veicolo è assicurata in qualsiasi posizione. Il fatto che durante il moto rettilineo esse sono sempre superiori al 20% del peso complessivo garantisce che non si raggiungano mai condizioni prossime al ribaltamento. In fase di sterzata, durante la rotazione del telaio B, la forza esercitata dalla zampa meno caricata diminuisce ulteriormente, pur restando entro limiti di sicurezza. Si nota che la distribuzione delle forze al suolo non dipende dal valore dell'accelerazione di gravità, la stabilità è garantita anche su piccoli pianeti e su asteroidi.

Non essendo necessario, per i veicoli a zampe, che le forze al suolo superino un certo valore di soglia per garantire l'avanzamento, è sufficiente che sia verificata la condizione di stabilità per assicurare il funzionamento della macchina. La stabilità è ancora assicurata anche considerando un errore della posizione del baricentro del telaio B pari a $0.07a_B$ o considerando un momento M_y di 5 Nm.

I grafici precedenti sono stati ottenuti con valori di d_{\min} e di d_{\max} rispettivamente di 0.08 e 0.16 m e con masse dei telai pari a 0.720 e 3.125 kg, in conformità alle caratteristiche costruttive del dimostratore che è stato realizzato. Simulazioni con il modello precedente dimostrano che, a prescindere dalla fattibilità costruttiva, è possibile ottenere una corsa relativa dei telai maggiore e conseguente risparmio energetico. Tale corsa è funzione del rapporto tra il peso dei due telai, della posizione del loro baricentro e dell'errore ε di posizionamento dei baricentri stessi. Indicando con a e b le dimensioni di ingombro dei due triangoli supposti uguali, con x_i le distanze dei baricentri dalle rispettive basi dei triangoli, il passo p ha le seguenti espressioni

$$\begin{cases} p = a [1 - \xi_B + \xi_A \Omega - \varepsilon_a] & \text{per } \varepsilon_a < \varepsilon_{a_{min}} \\ p = a \left[1 - \xi_B + \xi_A \Omega - \varepsilon_a \left(1 + \frac{1}{\sin(\beta)} \right) \right] & \text{per } \varepsilon_a > \varepsilon_{a_{min}} \end{cases} \quad (3)$$

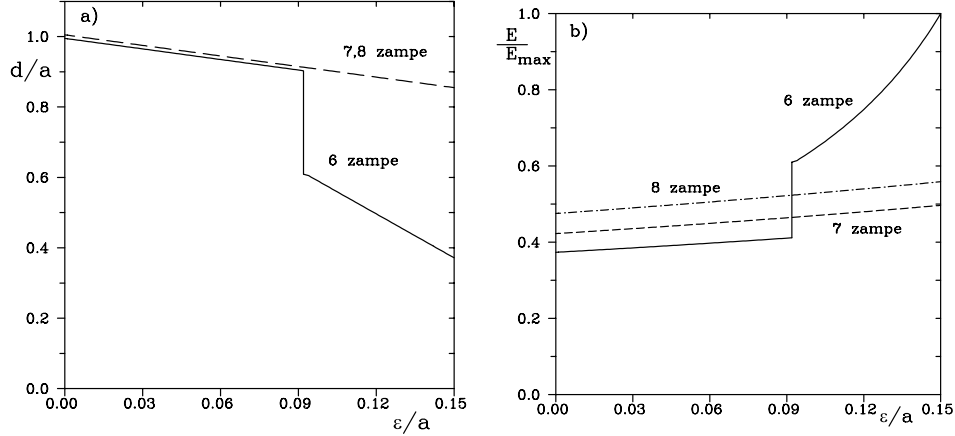


FIGURA 3: (a) Passo massimo di traslazione per veicoli a 6, 7, 8 zampe in funzione dell'errore di posizionamento del baricentro. (b) Consumo energetico per unità di percorso (adimensionalizzato rispetto al caso meno favorevole) in funzione dell'errore di posizione del baricentro del telaio B per veicolo a 6, 7, 8 zampe. Dati relativi al dimostratore WALKIE 6.

dove

$$\xi_i = x_i/a \quad \varepsilon_a = \varepsilon/a \quad \beta = \arctan(b/2a) \quad \Omega = P_A/P_B$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{a_{min}} = (1 - x_A)\Omega \sin(\beta) & \text{se } \Omega > 0 \\ \varepsilon_{a_{min}} = x_B \sin(\beta) & \text{se } \Omega = 0 \end{cases}$$

Il passo massimo e il corrispondente consumo energetico, adimensionalizzato rispetto al caso più sfavorevole, sono riportati in funzione dell'errore di posizionamento del baricentro del telaio B (Figura 3). Tali andamenti sono confrontati con i corrispondenti ottenuti nel caso in cui entrambi i telai, di forma rettangolare, abbiano 4 appoggi (ottopode) e nell'ipotesi in cui il telaio più leggero (A) abbia 4 appoggi e il telaio con il carico utile (B) abbia forma triangolare (eptapode). Per le ultime due soluzioni costruttive il passo p è legato ai parametri della macchina mediante la seguente espressione:

$$p = a[1 - \xi'_B + (1 - \xi'_A)\Omega - \varepsilon_a] \quad (4)$$

in cui $\xi'_i = x'_i/a$ ed x'_i indicano la posizione dei baricentri riferita alla base del telaio B. Esso nelle precedenti due soluzioni ha un valore sempre maggiore al passo dell'esapode per qualsiasi errore di posizione del baricentro. La diversità è dovuta, per il primo tratto della curva, all'impossibilità di ottenere nell'esapode un buon momento stabilizzante (dato dalla forza peso del telaio A) in posizione di tutto aperto, mentre se l'errore supera la soglia di ε_{\min} indicata precedentemente, si hanno delle limitazioni nella posizione di tutto chiuso che evitano ribaltamenti con rotazioni intorno agli altri due lati uguali del triangolo A. I consumi energetici sono, al variare di ε , proporzionali ai valori riportati nel grafico di figura 3 nelle ipotesi realistiche in cui $x_A = 0.4$ a $x'_A = 0.5a$, $x_B = x'_B = 0.15a$ ed $\Omega = 1/3$. Il grafico evidenzia la convenienza della soluzione a 6 zampe fino a valori di ε che non comportano problemi di stabilità nella

G. Genta, N. Amati

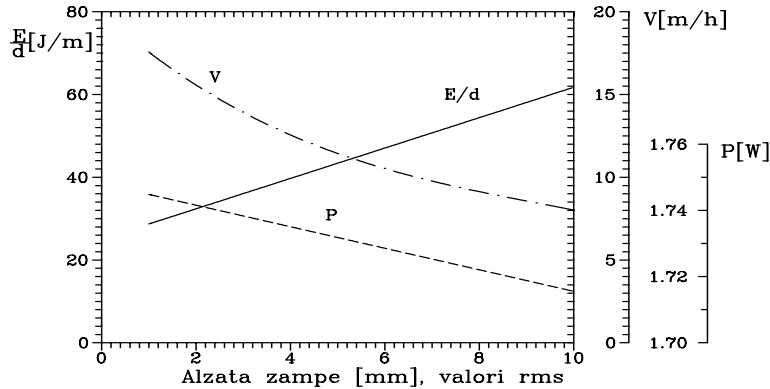


FIGURA 4: Andamento dell'energia per passo, della potenza e della velocità media in funzione del valore r.m.s. delle alzate delle zampe.

posizione di tutto chiuso, al di là di tale soglia entrambe le soluzioni a 7 o a 8 zampe sono vantaggiose. All'aumentare di Ω (nel caso in cui si riesca a distribuire parte del carico utile anche sul telaio A) l'esapode si dimostra sempre più vantaggioso al punto che nella condizione limite in cui i due telai hanno lo stesso carico la soluzione a 6 zampe risulta nettamente vantaggiosa per qualsiasi ε . Nell'ambito delle ipotesi fatte in questa sezione, è improbabile che l'ottopode possa presentare vantaggi rispetto alla soluzione a 7 zampe.

4. MOTO SU TERRENO ACCIDENTATO

La simulazione numerica con il modello matematico di seconda approssimazione [4] ha portato a risultati molto vicini a quelli ottenuti da prove sperimentali. Il modello ha messo in evidenza prestazioni della macchina al di là delle aspettative e delle specifiche per le quali il dimostratore è stato realizzato. Simulazione numerica e prove sperimentali sono state effettuate per differenti condizioni di funzionamento ma sempre su strada perfettamente liscia. Introducendo nel modello matematico la logica di controllo è possibile fare simulazione anche su terreno accidentato in modo da avere una stima più corretta dei consumi energetici in condizioni reali di funzionamento.

La struttura meccanica permette un controllo semplificato, effettuato mediante semplici controllori on/off che tolgono alimentazione ai motori elettrici quando la corrente da essi assorbita supera determinati valori di soglia. La irreversibilità degli attuatori permette di non far intervenire il controllo durante le fasi in cui non ha movimento; encoder ottici permettono di rilevare la posizione di ogni attuatore istante per istante. Ne consegue un completo disaccoppiamento dei moti verticali ed orizzontali e una determinazione esatta della posizione della macchina istante per istante. È stato possibile quindi simulare diverse superfici di prova generando per ogni punto di una griglia piana un numero casuale compreso in un intervallo predefinito. Facendo camminare la macchina su tali superfici, note le caratteristiche del terreno, si sono determinate le escursioni degli attuatori e i consumi energetici per ogni passo.

La simulazione è stata ripetuta per un certo numero di volte e i risultati ottenuti

G. Genta, N. Amati

per una percorrenza totale di 10 passi (0.8 m) sono stati riportati in Figura 4. Le curve relative alla potenza necessaria al moto, alla velocità ed all'energia necessaria a percorrere un passo in funzione del valore r.m.s. del profilo della superficie di prova sono state ottenute interpolando i punti relativi alle simulazioni numeriche mediante il metodo dei minimi quadrati. Si nota che il passare da una superficie praticamente liscia a un terreno accidentato con buche e picchi di 100 mm causa una notevole diminuzione di velocità (del 53%) ma non porta praticamente a variazioni della potenza necessaria al moto. In realtà si ha una piccola diminuzione della potenza media (del 2%), a causa del fatto che la potenza necessaria al movimento delle zampe a regime è minore di quella relativa al movimento dei telai. L'energia necessaria al moto aumenta del 51% circa. Questi risultati confermano le ottime prestazioni dei veicoli a zampe a telai rigidi su terreni molto accidentati. Utilizzando algoritmi di controllo più sofisticati, che permettono una alzata ottimale delle singole zampe, è possibile migliorare ulteriormente tali prestazioni.

Il ridotto aumento dell'energia necessaria al moto è dovuto al fatto che l'energia richiesta per il moto relativo dei telai e quella relativa all'accelerazione delle zampe non dipendono dalle condizioni del terreno. Il consumo totale aumenta quindi solamente a causa dell'energia richiesta per muovere le zampe una volta esaurito il transitorio (1 s) di accelerazione. Simulazioni eseguite su strada piana, con variazioni dell'alzata delle zampe del 50% nell'intorno del valore dell'alzata per cui si esaurisce il transitorio, evidenziano variazioni di consumo del 7% e confermano la considerazione precedente.

5. MODIFICHE DEL PROGETTO

WALKIE 6 è stato realizzato con lo scopo principale di dimostrare la fattibilità di un microrover basato sulla configurazione a telai rigidi e di verificarne le potenziali prestazioni. Simulazioni numeriche, validate da prove sperimentali, hanno evidenziato le modifiche da apportare alla macchina per migliorare il suo comportamento nelle varie condizioni di uso. Prescindendo dall'analisi di un sistema di ricupero di energia cinetica, l'utilizzo di motori e di attuatori con migliore rendimento e la riduzione degli attriti permettono di ottenere notevoli miglioramenti.

Come mostrato in Figura 5, nelle fasi 1, 3, 4, 6, il consumo è principalmente dovuto all'energia per accelerare le parti in movimento mentre nelle fasi 2 e 5 sono rilevanti le dissipazioni per attrito nelle guide. Nella versione attuale la vite e la guida longitudinale sono state sostituite con una vite a ricircolazione di sfere ed una guida a sfere, ottenendo una riduzione della potenza e dell'energia per passo rispettivamente del 27.5% e 39.5%. Misure differenziali di corrente al motore hanno permesso di valutare un rendimento pari a 0.75 per la vite a ricircolazione e un coefficiente di attrito medio guida-vite di 0.06; nel caso della vite con filetto triangolare si è misurato un rendimento di 0.17 e un coefficiente di attrito della guida in teflon di 0.17. La reversibilità della vite a ricircolazione non permette comunque la reversibilità del sistema di movimentazione longitudinale, dato che le forze assiali sulla vite stessa creano una coppia inferiore alla coppia resistente dovuta agli attriti interni. Tali inevitabili attriti possono essere sfruttati anche per la realizzazione di attuatori irreversibili con viti a ricircolazione di sfere per le zampe. La forza assiale massima sopportabile da ogni singola zampa può essere stimata valutando, con misure di corrente a vuoto al

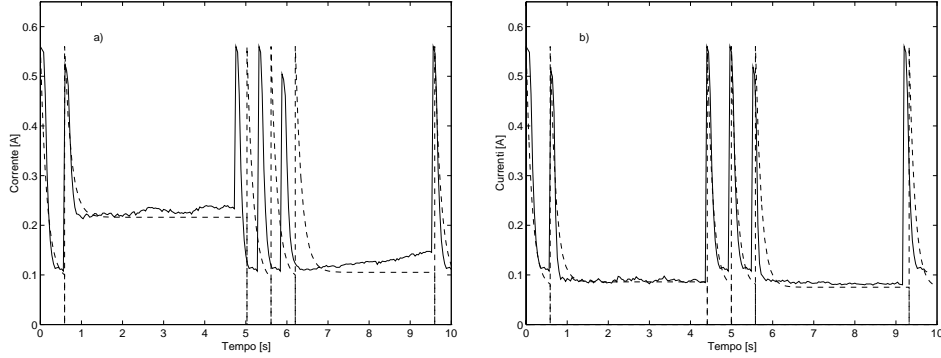


FIGURA 5: Andamento della corrente assorbita dai motori in un passo nel caso di guida ad attrito radente (a) e guida ad attrito volvente (b). Valori misurati (linea continua) e valori della sperimentazione numerica (linea tratteggiata).

motore, le coppie di attrito delle varie parti. Tale forza assiale è data dalla seguente espressione:

$$F_a = \left(\frac{2\pi\eta_s V}{p\tau} \right) \left[\eta_t \frac{I_0}{\omega_0} + \frac{I_{01} - I_0}{\omega_{01}} \right], \quad (5)$$

dove η_s , p , sono il rendimento e il passo della vite, η_t e τ il rendimento e il rapporto di trasmissione del riduttore, V la tensione al motore, I_0 e ω_0 corrente e velocità di rotazione a vuoto del motore mentre I_{01} e ω_{01} sono la corrente e la velocità di rotazione del motore a vuoto, con collegati solo il rotismo e l'albero della vite. Il primo termine in parentesi quadra è legato agli attriti nel motore elettrico mentre il secondo tiene conto degli attriti nei cuscinetti che supportano l'albero della vite. Con i componenti attuali F_a è stimato in 9.5 N; variando τ , p o introducendo piccoli attriti aggiuntivi si riescono ad ottenere forze assiali sufficienti a sopportare il peso della macchina. È anche pensabile che le zampe possano avere una piccola inclinazione rispetto all'asse verticale in modo tale che al contatto con il suolo, una forza perpendicolare all'asse della vite crei un piccolo momento sulla madre vite tale da rendere il sistema irreversibile. Una scelta di questo tipo risulta vantaggiosa quando si prospettano scenari con terreni molto accidentati che richiedono notevoli escursioni delle zampe.

Introducendo nel modello viti a ricircolazione di sfere sia per le zampe che per la guida, motori con buone prestazioni e rapporti di riduzione che implicano il massimo rendimento dei motori a regime, si ottengono ulteriori miglioramenti delle prestazioni rispetto al dimostratore, come è confermato dalla seguente tabella.

h_z (mm)	Dimostratore attuale			dimostratore ottimizzato		
	P(W)	V(m/h)	E/d(J)	P(W)	V(m/h)	E/d(J)
10	1.64	27.972	16.91	1.5	48.92	8.886
100	1.76	8.8	57.445	1.255	15.276	23.6667

A seconda delle diverse condizioni di lavoro, si possono variare i parametri per ottimizzare un aspetto specifico delle prestazioni della macchina.

6. CONCLUSIONI

Le simulazioni del comportamento di veicoli a zampe a telai rigidi hanno evidenziato le prestazioni, i limiti e i principali campi di applicazione di robot con le caratteristiche di WALKIE 6. Il modello, dando indicazioni sulle scelte costruttive (6, 7 o 8 zampe), valutando la stabilità, i consumi energetici e le prestazioni, permette di fare una analisi completa della macchina e fornisce risultati quantitativi che possono essere utilmente usati per compiere le necessarie scelte progettuali.

Si è evidenziata l'opportunità di ridurre gli attriti nella guida longitudinale ed aumentare il rendimento delle componenti meccaniche ed inoltre di distribuire il peso sui due telai costituenti la macchina. Si sono messi in luce i possibili vantaggi di una configurazione a 7 zampe nel caso in cui uno dei due telai sia molto più pesante dell'altro.

Simulazioni eseguite su terreno fortemente irregolare evidenziato come i robot a zampe a telai rigidi sono particolarmente vantaggiosi nel caso di terreni molto accidentati: passando da una strada liscia a irregolarità al limite delle possibilità della macchina (ostacoli di altezza pari alla metà dell'altezza del veicolo o ad un terzo della sua lunghezza) la velocità si riduce solamente del 50% circa, la potenza necessaria al moto resta all'incirca costante e il consumo energetico per unità di distanza percorsa aumenta anch'esso 50% circa. Tali risultati sono molto migliori di quelli ottenibili con qualsiasi veicolo a ruote e sicuramente confrontabili con quelli ottenibili con veicoli a zampe di complessità ben superiore, sia per quanto riguarda la configurazione meccanica che quella del sistema di controllo. Tali prestazioni su terreno accidentato si accompagnano al fatto che il carico utile viene mantenuto orizzontale, con una precisione dipendente solamente da quella dei sensori di orizzontalità, cosa che richiederebbe una notevole complessità nel caso di un veicolo a ruote ed anche in un veicolo a zampe in cui i moti orizzontali e verticali dei piedi non siano disaccoppiati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L.Bussolino, D. Del Corso, G. Genta, M.A. Perino, R.Somma, *ALGEN - A Walking Robotic Rover for Planetary Exploration*, 1997 Int. Conf. on Mobile Planetary Robots & Rover Roundup, Santa Monica, Gennaio 1997
- [2] *Micro-Robots for Scientific Applications - Micro-RoSA*, ESA Invitation to Tender AO/1- 3094/96/NL/JG, Agosto 1995
- [3] D.J. Todd, *Walking Machines: an Introduction to Legged Robots*, Kogan Page Ltd., Londra, 1985
- [4] G. Genta, N. Amati, *Performance Evaluation of Twin Rigid-Frames Hexapod Planetary Rovers*, accettato al MOVIC '98, Zurigo, Agosto 1998
- [5] A.Martin Alvarez, W.de Peuter, P.Gonzalez de Santos, M.A.Armada, *A Survey of Locomotion Concepts for Planetary Exploration Rovers*, ESA WPP-075, presented at the "3rd ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robot Applications - ASTRA 94", ESTEC, Noordwijk, Aprile 1994
- [6] G. Genta, *Motor vehicle dynamics*, World scientific, Singapore, 1997
- [7] T. Kenjo, S. Nagamori, *Permanent Magnet and Brushless DC Motors*, Clarendon Press, Oxford, 1985