

PROGETTO DI ROBOTICA  
(2,5 crediti)

**ANDATURE VELOCI PER ROBOT QUADRUPEDI**

# Indice

• Introduzione	pag. 3
• Controllore per un robot quadrupede	“ 5
• • Introduzione	“ 5
• • La meccanica	“ 5
• • Il controllore	“ 5
• • Esperimenti	“ 9
• Scout II	“ 15
• • Introduzione	“ 15
• • Il robot	“ 16
• • Il controllore	“ 17
• • Esperimenti	“ 18
• Templates e Anchors: modelli e ipotesi neuromeccaniche per la locomozione di robot a zampe sul terreno	“ 22
• • Introduzione	“ 22
• • Il Template: la sfida di un sistema complesso e ridondante	“ 23
• • L'Anchor: la necessità della neuromeccanica	“ 26
• Locomozione su terreni non piani	“ 28
• • Introduzione	“ 28
• • Cosa si intende per terreno difficile	“ 28
• • La scelta del sistema di locomozione	“ 30
• • Locomozione a zampe	“ 31
• • La configurazione delle zampe e il loro design	“ 32
• • La stabilità dei robot a zampe e le loro andature	“ 36
• Un approccio cerebrale alla locomozione di robot a zampe	“ 41



## *Analisi dello stato dell'arte.*

### **INTRODUZIONE**

La robotica è una scienza che si propone di sviluppare sistemi artificiali mobili che siano in grado di adattarsi all'ambiente. L'adattamento all'ambiente in cui un robot opera implica che il robot sia capace di percepire il mondo in cui si trova. Ciò significa, dunque, che il robot deve essere informato di ciò che accade intorno a lui attraverso l'uso di sensori. Allo stesso tempo, il robot deve essere in grado di interpretare le informazioni che riceve dai sensori interni ed esterni, grazie a programmi software che permettano al robot stesso di ragionare sulle informazioni sensoriali e di agire di conseguenza. Quanto detto finora vuol dire che la direzione della robotica nelle ricerche più recenti è di mettere il robot in condizione di acquisire conoscenza dalle esperienze già vissute tramite i suoi sensori. Compito fondamentale della robotica è, quindi, sviluppare teorie di coordinamento e comunicazione in modo da poter integrare il livello fisico con la percezione del reale attraverso il task che si vuole far svolgere al robot. In particolare, un robot mobile è un sistema in grado di muoversi autonomamente in ambienti più o meno strutturati, mediante l'uso di sistemi di locomozione, tipicamente ruote o zampe, sebbene esistano altri tipi di sistemi quali cingoli e altri. Solitamente questi sistemi sono dotati di sensori che forniscono loro informazioni riguardanti l'ambiente esterno. A seconda delle funzioni che svolgono, i sensori si dividono in varie categorie. Esistono sensori della percezione che individuano la presenza di un oggetto nelle immediate vicinanze del robot, sensori della distanza in grado di misurare la distanza che separa il robot da altri oggetti presenti nel suo mondo, sensori tattili che rivelano il contatto del robot con altri oggetti, sensori della visione, tipicamente telecamere, che rendono possibile la visualizzazione di ciò che il robot vede.

Un robot mobile è guidato da un operatore umano mediante l'uso di un'interfaccia di alto livello dalla quale è possibile assegnare dei compiti e comandare le operazioni che si vogliono far svolgere al robot. Anche il robot è dotato di un calcolatore che gli permette di svolgere autonomamente determinate funzioni, quali, ad esempio, il controllo.

Un robot, infatti, è un sistema suddiviso in molti sottosistemi, ognuno dei quali svolge una particolare funzione. L'operatore agisce sul sistema pianificazione per programmare il robot in un qualche linguaggio di programmazione. La pianificazione influenza il controllore che può azionare motori e alimentatori, mettendo i giunti e gli altri elementi della meccanica in condizione di muoversi. In

questo modo il robot può svolgere la funzione per cui è stato programmato, costantemente supportato da un eventuale sistema di sensori con i quali esso può interfacciarsi e ricavare informazioni.

Sensori e attuatori sono, quindi, gli elementi basilari di un sistema robotica, ma essi sono comandati dal sottosistema controllo che assume, di conseguenza, un ruolo fondamentale.

A seconda delle esigenze di compito del robot, si possono avere diversi tipi di controllori che pongono l'enfasi su differenti fini. Nei sistemi industriali si rende necessaria una grande precisione nel posizionamento del robot con conseguente focus sul controllo in posizione. Nei sistemi autonomi si ha un maggiore interesse per un buon adattamento all'ambiente, per cui si utilizza un controllo in forza.

Ci si rende conto a questo punto che l'interazione con il mondo diventa fondamentale. Si presentano, dunque, diversi problemi. Infatti, ora occorre modellizzare non solo il robot che si vuole realizzare, ma anche il mondo in cui esso deve operare. Da non sottovalutare è che il modello del mondo può essere dinamico, ovvero può cambiare ed evolversi in un arco temporale. Un mondo che si evolve è un modello complesso, in caso contrario si dice semplice. Una macchina autonoma è una macchina in grado di produrre un comportamento a fronte di stimoli ricevuti dall'esterno attraverso il suo sistema sensoriale. Il compito di guidare il robot nelle scelte a livello autonomo è affidata al controllore. Il controllo è, tipicamente, un sistema che fornisce al robot una sorta di intelligenza. Spesso si pone al progettista un secondo problema di non minore importanza e di difficile soluzione: il controllo deve essere affidato ad una rete neurale di un qualche tipo, oppure deve essere insito nel sistema meccanico del robot? Come spesso accade, la risposta a questa domanda non è univoca: a seconda delle situazioni e degli scopi che si vogliono raggiungere per mezzo del robot, essa può indirizzarsi nell'uno o nell'altro verso.

# • **CONTROLLORE PER UN ROBOT QUADRUPEDE**

## ➤ **INTRODUZIONE**

L'università di Zurigo ha progettato un robot mobile a quattro zampe con lo scopo di studiare in modo approfondito il controllore implementato per la sua locomozione. Tale controllore utilizza un anello di coppie di oscillatori non lineari. Esso è molto efficiente poiché non ha bisogno di software e necessita soltanto di un piccolo numero di parametri per i componenti per garantire la coordinazione tra i movimenti delle zampe che guidano il moto. Come descritto di seguito, a seconda dello stato del controllore si possono osservare due diversi tipi di andatura del robot.

Le coppie di oscillatori utilizzati per il controllo della locomozione del robot sono frutto di una lunga storia di ricerca. Nel modello centrale della locomozione della lampreda, modello utilizzato nel robot in questione, i generatori, basati sull'effetto di sensori come coppie di generatori, sono ritenuti causa di coordinazione intersegmentale. Il moto degli insetti offre numerose controversie sull'argomento del controllo. Esistono diversi tipi di controllori utilizzati in questo tipo di problemi. Lo specifico controllore qui descritto si colloca nella categoria dei controllori ibridi. Esso può generare una locomozione stabile senza sensori di input, ma permette al comportamento del robot di cambiare, in base alle informazioni sensoriali, la sua direzione di moto e la sua andatura.

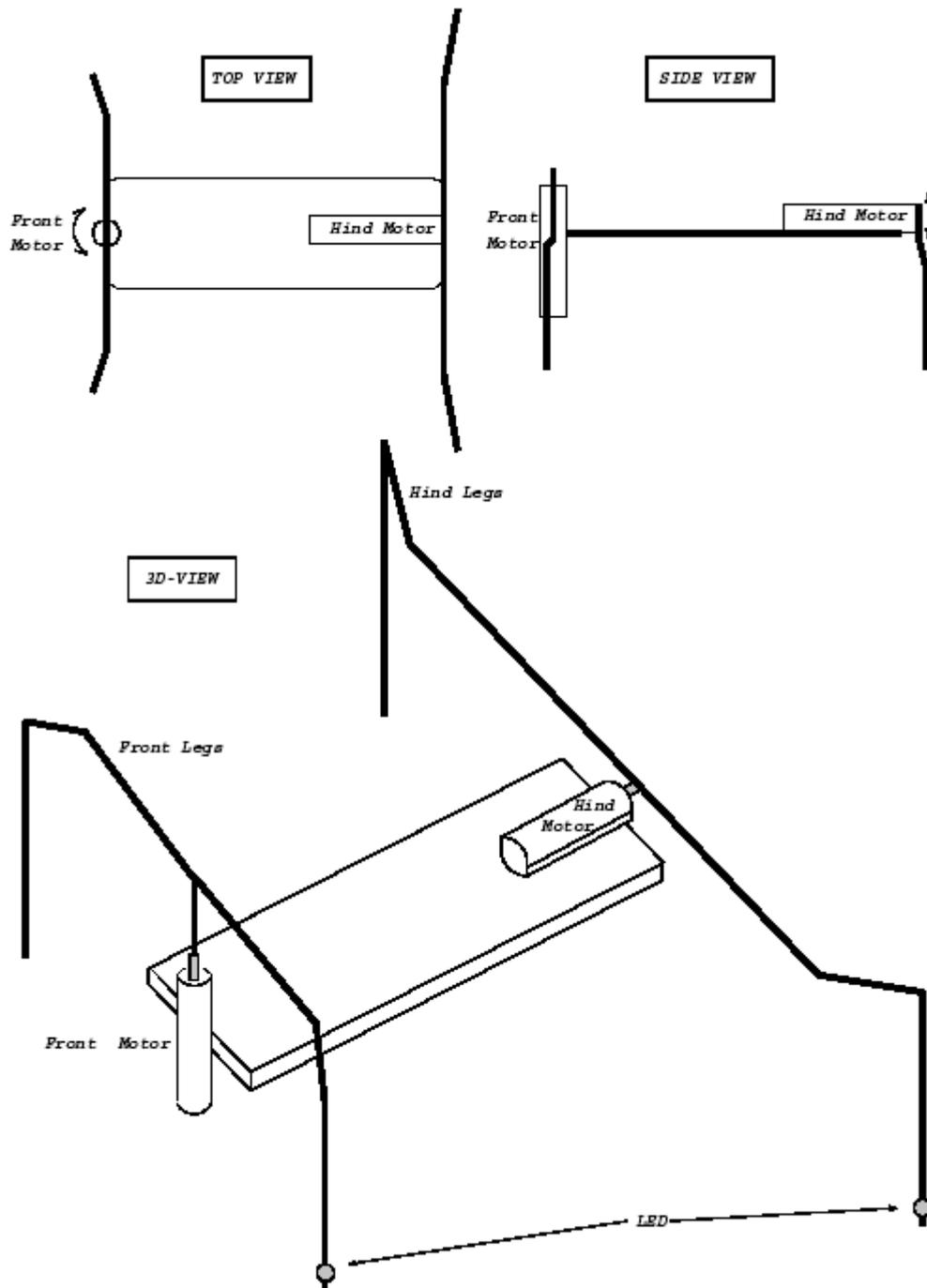
## ➤ **LA MECCANICA DELLA MACCHINA**

Il robot consiste di un piano rettangolare parallelo al terreno, le cui misure sono 9 cm di lunghezza e 3 cm di larghezza. A questo corpo rettangolare sono attaccati due motori a corrente continua. Ognuno dei due motori guida e attiva un paio di zampe, tipicamente la coppia di zampe anteriori oppure quella posteriore. Le zampe sono attaccate al corpo attraverso un collegamento con il proprio motore. Esse hanno una forma ad U rovesciata che sovrasta il corpo principale. Le zampe anteriori sono attivate da un motore il cui asse è perpendicolare al corpo del robot e possono muoversi in avanti oppure all'indietro. Le zampe posteriori sono guidate da un motore il cui asse è parallelo al corpo del robot. Quando il motore posteriore gira, le zampe attaccate ad esso sono a terra in modo tale da far ondulare il corpo da un lato e dall'altro. Questo porta ad un cambiamento della distribuzione del peso del robot sulle zampe anteriori.

## ➤ **IL CONTROLLORE**

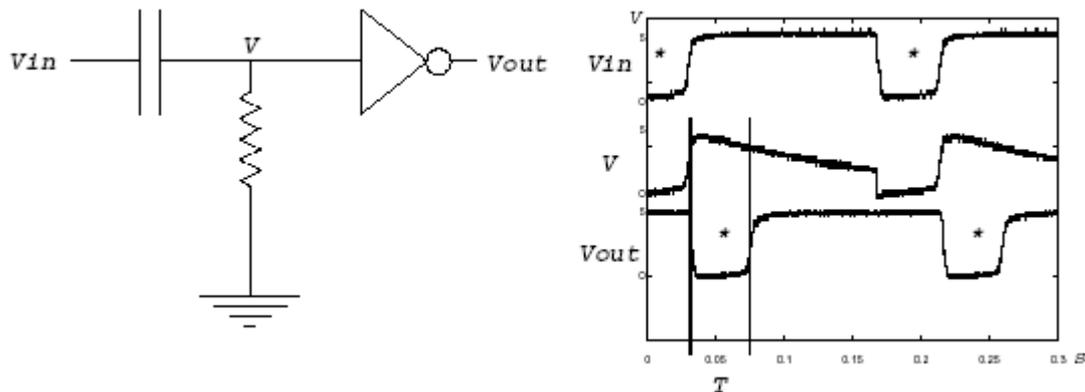
Negli schemi riportati di seguito si può osservare la struttura del robot dall'alto in una proiezione orizzontale, da un lato in una prospettiva laterale e, infine, in prospettiva. Si nota la posizione dei due motori, uno perpendicolare e l'altro parallelo al corpo del robot, la particolare forma delle zampe e i loro collegamenti con il corpo

attraverso il rispettivo motore e nella prospettiva si possono individuare anche i due led che permettono la ricostruzione della traiettoria del robot in funzione del tempo.



*Rappresentazione schematica della struttura del robot*

L'idea per il controllore di questo robot quadrupede è stata introdotta da Tilden, il quale studiò un controllore basato su coppie di differenziatori. Il controllore implementato sul robot descritto è più semplice, ma utilizza come elemento principale un anello di coppie di oscillatori. Lo schema elettronico dell'elemento base utilizzato dal controllore è quello mostrato in figura.



Rappresentazione dello schema elettronico dell'oscillatore e andamento delle tensioni in funzione del tempo

L'oscillatore si compone di un filtro RC passalto e, in cascata, una porta not. Quattro di questi elementi sono disposti in due coppie all'interno di un anello. Ognuno di questi oscillatori dà un segnale di output (un salto da 5V a 0V di tensione al tempo  $t = t_1$ , seguito da un gradino da 0V a 5V di tensione dopo un periodo T) come un risultato di un margine che arriva al suo input  $V_{in}$  al tempo  $t = t_1$ . la durata in tempo del segnale può essere calcolata risolvendo l'equazione differenziale per la tensione V al nodo di input dell'inverter:

$$\dot{V} + \frac{V}{\tau} = \dot{V}_{in}$$

dove  $\tau$  è la costante di tempo RC del filtro passalto.

La soluzione

$$V = V_{max} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

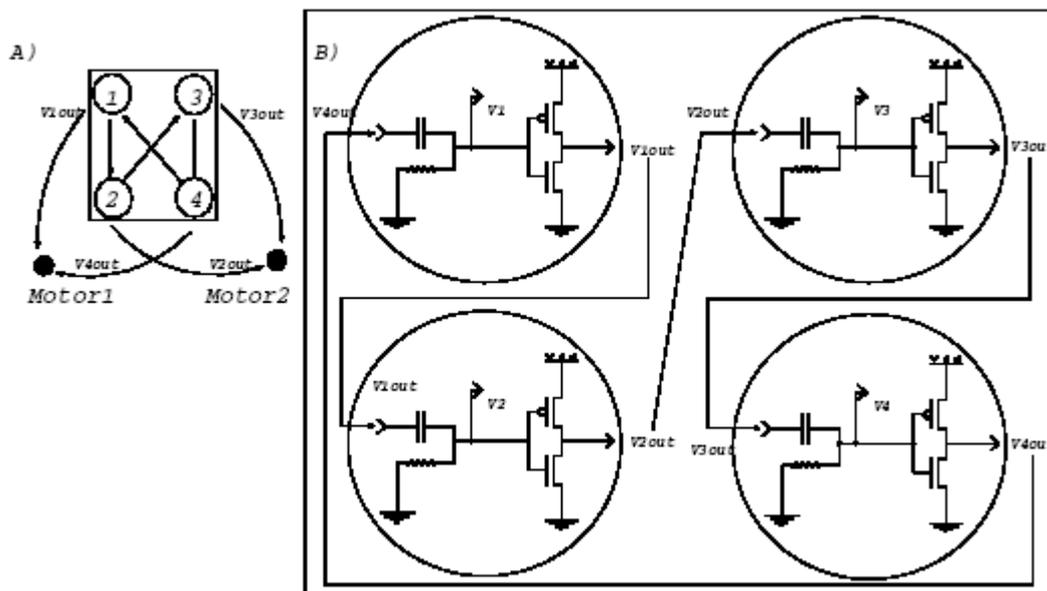
dove  $V_{max}$  è la massima tensione al nodo V, porta al tempo che si impiega per scendere alla tensione di soglia dell'inverter. Questa può essere identificata come la durata del segnale T:

$$T = RC \ln \frac{V_{max}}{V_{th}}$$

con  $V_{th}$  tensione di soglia dell'inverter nella transizione da un livello alto ad un livello basso di tensione. Si può notare come questo tempo T sia proporzionale alla costante di tempo  $\tau = RC$  poiché  $V_{th}$  può essere considerata costante.

Dal momento che le capacità C sono prese costanti e identiche in questo tipo di controllore, le resistenze diventano il parametro di controllo del tempo di durata del segnale in ognuno degli oscillatori presenti nel controllore. Le uscite di questi elementi oscillanti sono onde quadre che sono usate per guidare un motore. Gli output di due degli elementi che formano l'anello sono utilizzati per guidare e attivare

il motore anteriore, mentre gli altri due sono usati per guidare il motore posteriore. Le uscite degli oscillatori sono connesse a due a due mediante buffers agli input del motore e la differenza di potenziale su quel particolare motore fa sì che esso si giri in una o in un'altra direzione. Quando la differenza di potenziale è invertita, anche la direzione sarà invertita. La forma degli output, inoltre, porta al movimento i motori e così le zampe possono muoversi in avanti o all'indietro, in un ritmo che è determinato sia dai tempi di durata del segnale degli elementi coinvolti nel controllo di quel particolare motore sia dal modo di corrente nel controllore (attraverso l'anello possono essere propagati uno o due segnali).



Nelle figure sopra riportate si osserva la disposizione dei quattro oscillatori all'interno dell'anello e la loro connessione ai due motori del robot. L'uscita di ogni oscillatore diventa l'ingresso dell'oscillatore successivo e l'uscita del quarto oscillatore rappresenta l'ingresso per il primo dei quattro, in un ciclo che si ripete.

Essendo le zampe del robot legate a due a due nella parte anteriore e in quella posteriore, la fase tra loro è fissata a 180°. I due differenti modi del controllore producano così due diversi tipi di andatura. L'asincronia degli output degli elementi nell'anello, indotta da costanti di tempo non identiche, può essere usata per cambiare il comportamento del robot. La costante di tempo di ogni elemento può essere cambiata individualmente da un semplice sensore in tempo reale. Inoltre, le informazioni sensoriali possono essere usate per modificare direttamente i comportamenti del robot.

### ➤ ESPERIMENTI

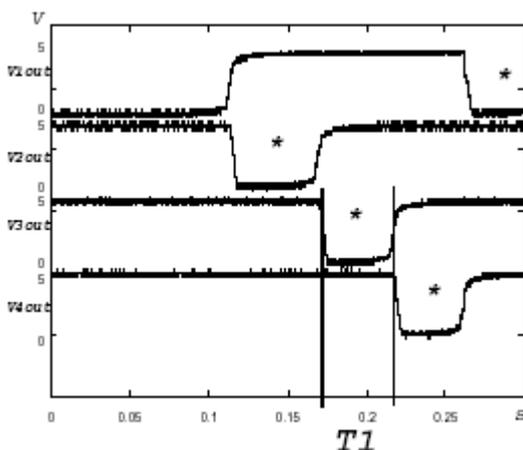
Per l'osservazione di tali comportamenti sono richiesti simultaneamente dati per la memorizzazione delle traiettorie dei piedi del robot e dello stato interno del controllore.

Su un lato della macchina sono attaccati ai piedi del robot dei LED. Una telecamera CCD monitora il robot e un algoritmo traccia i punti luminosi generati dai LED in modo da poter disegnare la traiettoria descritta dal robot. Per mezzo di questo dispositivo si hanno a disposizione la posizione orizzontale e la posizione verticale delle zampe robot come funzione del tempo. La posizione orizzontale dei piedi del robot indica il movimento in avanti oppure all'indietro, mentre la posizione verticale mostra la sua altezza. Gli stati interni sono rappresentati dalle tensioni ai molti nodi del controllore come funzione del tempo. Negli esperimenti si è scelto di misurare i segnali di output che guidano i motori per mostrare la relazione di causa effetto che lega queste tensioni alle traiettorie dei piedi. Sono stati inoltre memorizzati i dati relativi ai due modi possibili del controllore per poter osservare le due differenti andature risultanti.

I grafici riportati nelle pagine seguenti mostrano i dati immagazzinati mentre il robot era attivo e il suo controllore si trovava nei due differenti modi di utilizzo, di cui sono rappresentati gli andamenti in tensione.

La traccia superiore di ognuno dei due diagrammi indica lo spostamento orizzontale del piede anteriore sinistro (spostamento positivo è nella direzione di movimento del robot) come funzione del tempo, la seconda traccia a partire dall'alto mostra la posizione verticale dello stesso piede (dove a uno spostamento positivo corrisponde una salita). La terza e la quarta traccia mostrano lo spostamento orizzontale e verticale delle zampe posteriori con le stesse convenzioni di segno. Le tracce presenti nella metà inferiore di ciascuno dei due diagrammi rappresentano le tensioni di uscita degli oscillatori che, costituendone la componente essenziale, guidano i motori del robot. Le prime due delle quattro tracce presenti nella parte inferiore dei diagrammi rappresentano le tensioni al motore anteriore, mentre le ultime due tracce riguardano le tensioni del motore posteriore.

Nel primo dei due diagrammi il controllore del robot si trovava nel modo di funzionamento riportato nella seguente figura.



*Diagramma degli andamenti delle tensioni agli oscillatori del controllore durante il primo esperimento descritto.*

Le linee verticali presenti sulla figura stanno ad indicare l'intervallo di tempo in cui ciclicamente si effettua il rilevamento.

In metà ciclo di oscillazione il motore posteriore effettua una torsione del corpo nella posizione che toglie peso dalla zampa anteriore sinistra rendendo possibile il suo

movimento grazie all'azionamento simultaneo del motore anteriore. Durante quest'arco di tempo la zampa anteriore può essere osservata mentre si muove in avanti (prima traccia). Durante l'altra metà del ciclo temporale il peso è simultaneamente posto sulla zampa anteriore sinistra dal movimento del motore posteriore e la zampa viene mossa all'indietro dal motore anteriore.

Tutto ciò rende possibile lo spostamento del robot in avanti come espresso dal totale spostamento positivo, individuabile sul diagramma, delle zampe anteriori e posteriori nella direzione orizzontale durante un ciclo. Tutte le operazioni descritte e rappresentate nel diagramma sono state effettuate a velocità molto ridotta per evidenti esigenze pratiche. Se l'attrito fra la zampa anteriore sinistra e il terreno fosse ideale, non sarebbe possibile vedere il movimento a ritroso della zampa dovuto a scivolamento.

Al contrario, si possono solo notare le zampe posteriori mentre sono trascinate in avanti durante questa parte del ciclo. Esse si muovono in avanti in un modo abbastanza continuo, mostrando un impercettibile movimento all'indietro dovuto allo scivolamento cui si faceva riferimento. Lo spostamento verticale di entrambe le zampe osservate è irrilevante, trascurabile. Le variazioni osservabili sono dovute soprattutto ad errori di tracciamento delle misurazioni. Ciò significa che lo spostamento del peso tra le zampe anteriori, indotto dal movimento del motore posteriore, non è sufficiente per sollevare le zampe posteriori. La simmetria dell'andatura osservata in quest'esperimento somiglia a quella di un trotto.

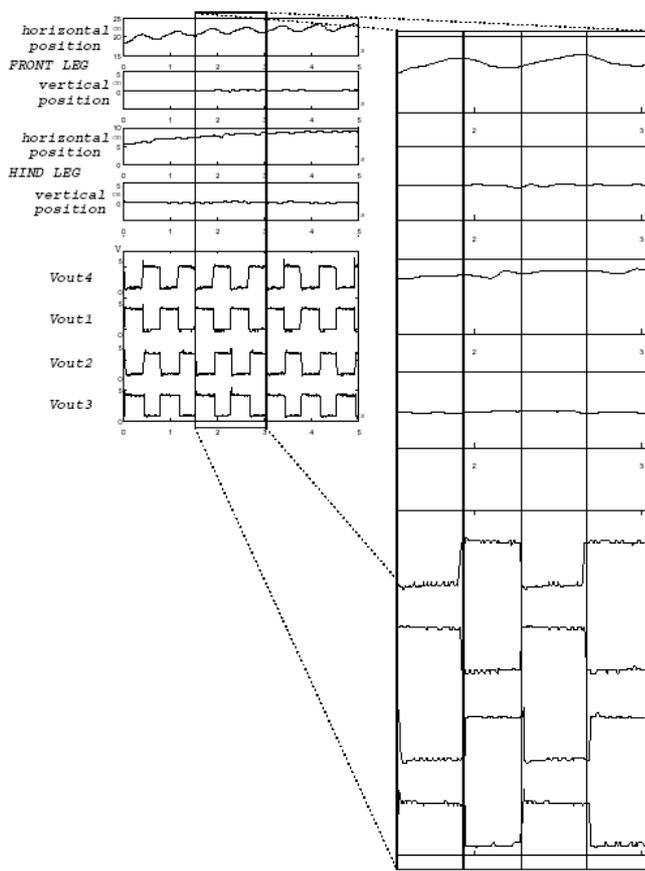


Diagramma degli andamenti delle tensioni e degli spostamenti delle zampe del robot durante il primo esperimento effettuato.

Il secondo diagramma (riportato alla pagina seguente) mostra i dati registrati durante un secondo esperimento, in cui il controllore operava nell'altro suo modo possibile, di cui sono descritte le tensioni agli oscillatori dello stesso controllore nella figura seguente.

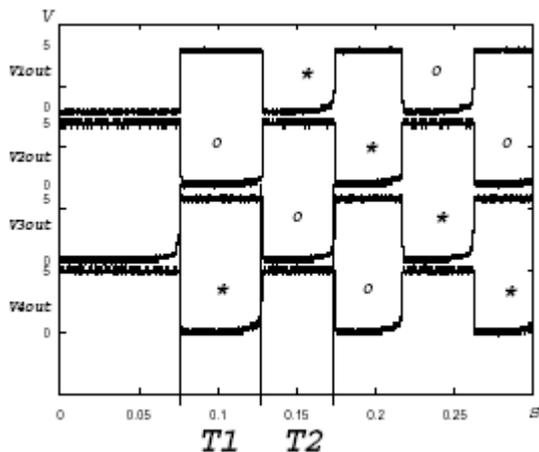
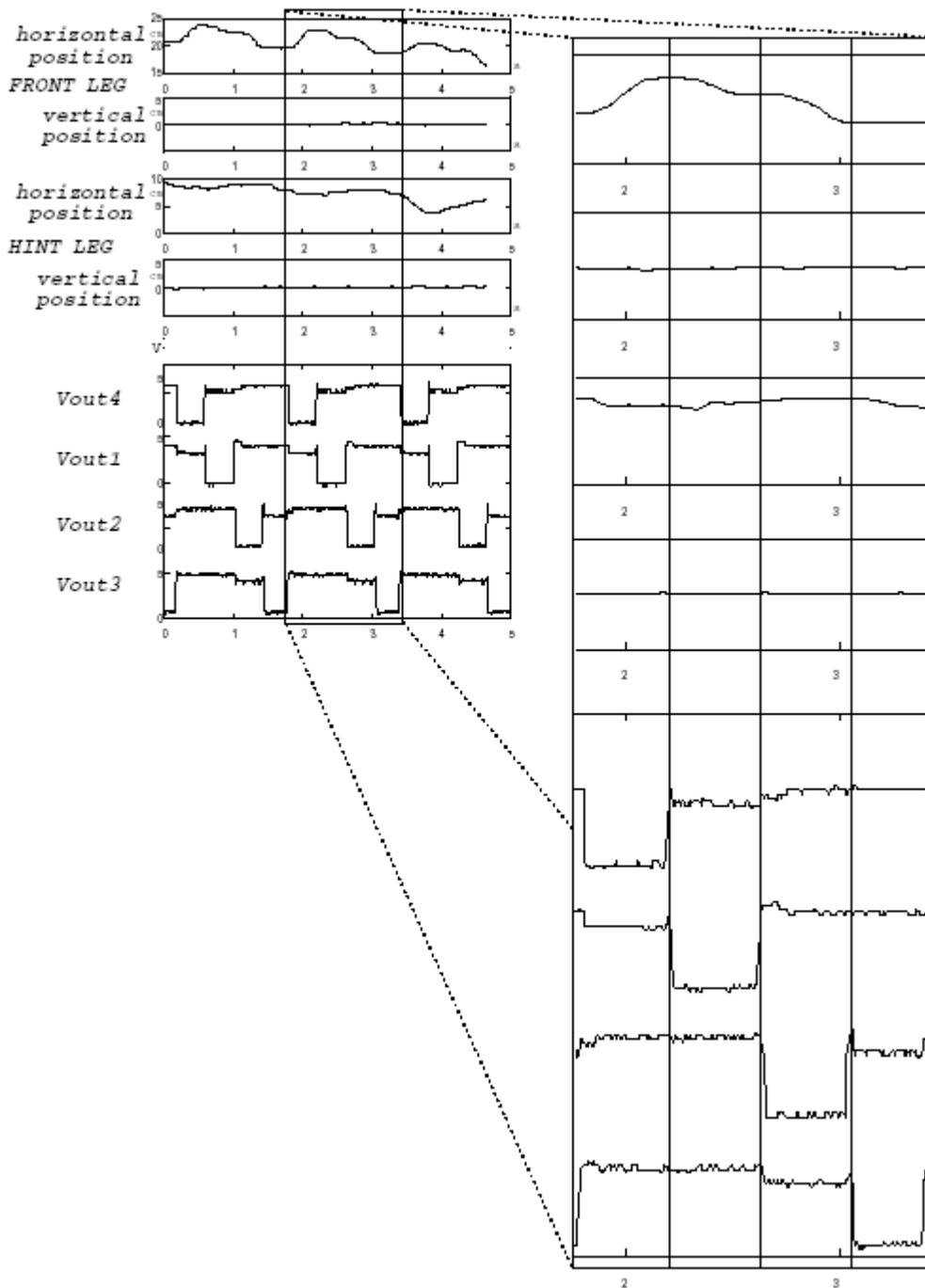


Diagramma degli andamenti delle tensioni agli oscillatori del controllore del robot durante il secondo esperimento.

In questo caso, si può osservare un movimento più lento del robot e si può notare come esso si muova all'indietro.

Guardando attentamente gli andamenti delle tensioni tracciati nel secondo dei due diagrammi, si può notare che la zampa anteriore sinistra si muove in avanti quando l'uscita del quarto oscillatore dell'anello ( $V_{out4}$ ) ha valore basso, poiché questo rende possibile lo spostamento della zampa in avanti da parte del motore anteriore. Le zampe posteriori si muovono all'indietro a causa dello scivolamento. Durante l'intervallo di tempo successivo, il segnale che si propaga all'interno del controllore rende bassa l'uscita del nodo successivo. Questo causa il movimento del motore anteriore all'indietro, quindi le zampe anteriori retrocedono. Durante il successivo intervallo di tempo il motore posteriore gira le zampe posteriori verso il basso, togliendo per mezzo di ciò il peso dalle zampe anteriori e causandone lo scivolamento all'indietro. Nell'ultimo intervallo di tempo, il motore posteriore gira nell'altra direzione. Ciò non ha effetti sulla zampa anteriore sinistra, ma costringe le zampe posteriori a muoversi all'indietro. Questo movimento può essere osservato sul diagramma come uno spostamento totalmente negativo nella direzione orizzontale.

La velocità complessiva di questo secondo esperimento è di gran lunga inferiore rispetto al precedente. L'andatura che ne risulta sembra essere un movimento a ritroso.



*Diagramma delle tensioni e degli spostamenti delle zampe del robot durante il secondo esperimento descritto.*

Si è, dunque, parlato della struttura fisica e del funzionamento di un particolare controllore e si è descritto il suo testing su un robot quadrupede. Il controllore ha rispettato le aspettative dei suoi ideatori, permettendo al robot di muoversi con entrambe le andature che si voleva fargli assumere. La meccanica del controllore, al meglio delle connessioni tra tensioni e motori del robot, rende possibile l'osservazione delle andature sulla macchina e permette di essere messa in relazione ad esse. La struttura del controllore, come già spiegato, sfrutta come elemento

principale un anello di oscillatori, in cui l'uscita di uno di essi diventa l'ingresso del successivo. In questo particolare controllore, l'anello è formato da quattro oscillatori, i quali permettono al robot un movimento in avanti relativamente veloce, mentre nell'andatura all'indietro si osserva una velocità notevolmente ridotta.

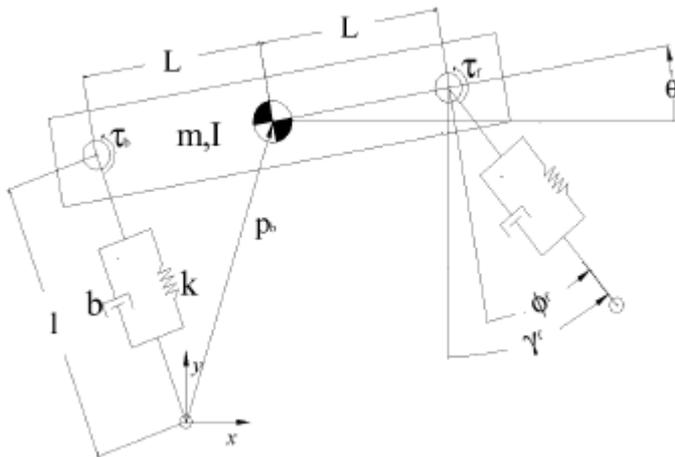
Si può passare da un tipo di andatura all'altro semplicemente variando la tensione d'ingresso del primo oscillatore. In conseguenza di ciò, si avrà un'inversione di tutte le oscillazioni all'interno dell'anello. Ovviamente, a tensioni inverse corrisponde un inverso movimento dei motori e conseguentemente essi guideranno il robot in avanti oppure all'indietro. Tutto ciò può essere realizzato in modo molto semplice con un sensore tattile esterno direttamente collegato ai motori, i quali potranno, così, reagire autonomamente a stimoli provenienti dal mondo in cui il robot si muove ed opera. L'uso di sensori tattili e, in aggiunta, di sensori della prossimità può rendere il robot capace di rilevare ed evitare ostacoli. Altre informazioni sensoriali possono cambiare il comportamento del controllore e, quindi, del robot, direttamente modificando delle resistenze variabili presenti nella struttura fisica del controllore stesso. Queste variazioni di resistenza avrebbero l'effetto di modificare la durata del segnale e, quindi, la coordinazione dei movimenti del robot. Tutto ciò può portare il robot a mutare comportamento. Inoltre, si potrebbero disporre dei sensori sui fianchi del robot, in modo da rendere possibile una virata nel momento in cui esso rilevasse degli ostacoli laterali.

Inoltre sono stati descritti degli svantaggi dovuti alla struttura fisica del robot. Si è parlato, infatti, del problema dello scivolamento delle zampe durante il movimento delle zampe opposte. A questo problema il controllore descritto non provvede in nessun modo e, d'altra parte, non era stato progettato pensando a questo inconveniente, quindi non ha la capacità di rimediare. Ne deriva che il movimento di un motore rispetto all'altro risulta limitato.

## • SCOUT II



*Il robot quadrupede SCOUT II*

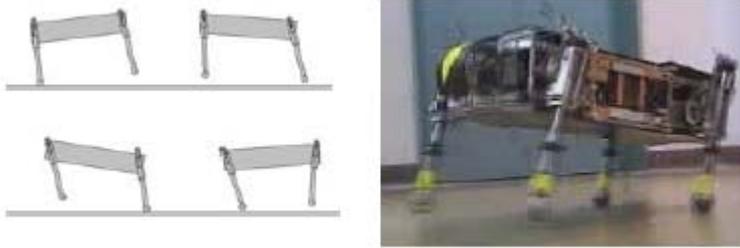


*Schema del modello del robot mobile a quattro zampe Scout II*

### ➤ INTRODUZIONE

Il robot quadrupede Scout II è un progetto dell'università McGill di Montreal, in Canada. Esso si muove su un terreno piano con andatura saltellante.

Il progetto di Scout II è motivato dallo sforzo di capire quale sia il design meccanico minimale e quale complessità nel controllo si debba raggiungere nella locomozione dinamicamente stabile. La realizzazione di tale progetto ha dimostrato che anche con una meccanica molto semplice come quella di Scout II e con controllori in anello aperto sui quali si basa l'affidabilità del robot è possibile raggiungere prestazioni ottime e risultati rilevanti. Ogni zampa di Scout II ha un solo attuatore e due gradi di libertà.



*Il modello di andatura saltellante adottato per Scout II e un fermo immagine del robot in movimento*

Nel passato si è cercato di progettare robot staticamente stabili minimizzando i movimenti verticali del corpo durante la locomozione. Questo requisito richiede zampe molto complesse con almeno tre gradi di libertà e un dispositivo che funga da caviglia legando la zampa al piede. Ne risultano un costo di produzione molto elevato, una grande complessità meccanica ed una bassa realizzabilità che rendono difficile l'inserimento di questo tipo di robot nei compiti del mondo reale.

Al contrario, la locomozione dinamica con zampe servili permette non solo di migliorare enormemente la mobilità fornita dalle macchine staticamente stabili e di raggiungere velocità maggiori, ma allo stesso tempo, grazie a questi miglioramenti, permette anche di semplificare sempre più la meccanica delle zampe. Una locomozione di questo tipo può utilizzare riserva di energia per muovere le zampe interessate dall'azione e permette il rilascio sulle zampe passive. È importante sottolineare che nonostante la grandissima semplicità meccanica si ottiene una notevole mobilità basata su controllori in anello aperto.

Con solo un attuatore per zampa, Scout II ottiene una piena mobilità nel piano e raggiunge velocità superiori a 1.2 m/s con un'andatura saltellante. Questi primi risultati e la ricerche ancora in corso suggeriscono il possibile raggiungimento di velocità ancor più elevate e di una maggiore mobilità anche su terreni non piani.

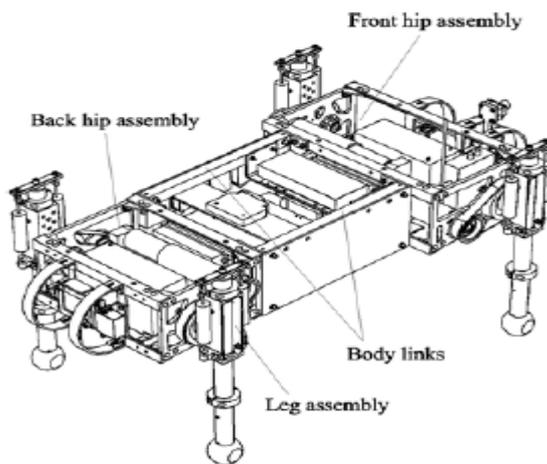
## ➤ IL ROBOT

Il robot quadrupede Scout II ha un corpo principale nel quale sono contenuti i componenti essenziali che forniscono al robot la capacità di compiere operazioni di calcolo, input e output, percezione, attuazione in modo autonomo. Vi sono, infine, collocate le batterie. Ognuna delle quattro zampe ha un unico giunto di rotazione che ruota nel piano laterale al corpo principale del robot, attuato sul fianco del corpo principale da un solo motore. Senza articolazioni per le zampe, il gioco del piede durante la fase di oscillazione può essere realizzato con ogni andatura che includa una fase di volo, come, per esempio, il pronking, il trotting e il bounding. Per Scout II è stata scelta l'andatura saltellante poiché permette una facile transizione dall'andatura di cammino saltellante che è oggetto di studio.

In figura è riportato uno schema delle caratteristiche meccaniche del robot.

Si può notare come la struttura meccanica del quadrupede sia realmente molto semplice e ciò rende ancor più importanti i risultati ottenuti dal robot a livello di prestazioni nelle simulazioni e nelle sperimentazioni.

Il corpo principale del robot è di forma rettangolare e contiene vari componenti per operazioni autonome. Sui due lati del corpo principale sono connesse le quattro zampe, due per parte, esattamente alle estremità del corpo, in modo simmetrico. Le zampe hanno una meccanica molto semplice, come già detto più volte. L'unico attuatore presente in ogni zampa viene attivato da un solo motore. Ogni zampa è in grado di muoversi ruotando sul piano laterale del corpo. Le zampe si dividono in due parti. Circa alla metà di ognuna di esse è presente un dispositivo atto a smorzare le oscillazioni che il corpo principale è costretto a subire. Ogni zampa risulta avere esattamente due gradi di libertà.



### ➤ IL CONTROLLORE

Considerata la mobilità delle zampe di Scout II nel piano laterale al robot stesso, il sistema risulta avere quattro gradi di libertà in ogni singola fase di posizionamento e cinque gradi di libertà durante il volo, con solo due input di controllo per la torsione dell'anca. Il controllore realizza una corsa alla velocità desiderata  $d(x_d)/d(t)$  in direzione frontale alla posizione del robot ponendo ogni zampa all'angolazione desiderata  $\vartheta_d$

$$\left\{ \begin{array}{l} XCG_d = \dot{x} T_s / 2 + k_x (x - x_d) + a \\ \gamma_d = \arctan \left( \frac{XCG_d}{\sqrt{l^2 - XCG_d^2}} \right) \\ \phi_d = \gamma_d - \theta \end{array} \right.$$

e applicando un momento alla zampa del valore  $\tau = k_v(d(x)/d(t) - d(x_d)/d(t))$  durante il posizionamento. Il controllore, considerando l'algoritmo di posizionamento del piede, è un controllore a tre parti di Raibert, il quale, circa venti anni fa, ha studiato dei sistemi di controllo che permettono di stabilizzare il movimento veloce di alcuni tipi di robot a zampe.

Le differenze chiave del controllore di Scout II sono rese necessarie dall'assenza di un attuatore lineare di spinta della zampa. Quindi, tale mancanza ha come diretta conseguenza l'aggiunta di energia alle dinamiche verticali del corpo. Infatti, il termine di offset  $a$  nelle equazioni sopra riportate rappresenta una dispersione nel verso verticale dell'energia impiegata per lo spostamento nel senso orizzontale. Questa perdita di energia è poi compensata durante la fase di posizionamento da un esplicito controllo della velocità. Non c'è un controllo esplicito delle oscillazioni di beccheggio del corpo principale: i controllori anteriori e posteriori delle zampe sono indipendenti. Essi lavorano esclusivamente sulla zampa individuale e non fanno uso di uno stato del corpo nel suo complesso. Il controllore di Scout II è, quindi, meno complesso del controllore a tre parti di Raibert. Esso è, infatti, un controllore in anello aperto, senza retroazione e quindi senza un feedback da parte del robot, di cui, però, non si ha bisogno dato che l'intento è quello di assegnare valori ai parametri del controllore in modo che il quadrupede compia le operazioni desiderate.

Le simulazioni effettuate mediante strumenti software mostrano che, nonostante la sua semplicità, questo tipo di controllore montato su Scout II ha successo non solo nel controllo stabile della velocità, ma anche nel tracciare rapidamente un profilo dei mutamenti della velocità nel verso frontale.

Una versione in anello aperto di questo controllore è un tentativo di dimostrare la più semplice forma di controllo di corsa di un robot quadrupede con zampe servili senza un esplicito feedback di controllo delle oscillazioni del corpo e della velocità nel verso frontale. Il funzionamento di questo tipo di controllore è, quindi, molto semplice: esso comanda la costante desiderata per il momento dell'anca durante la fase di posizionamento e la costante desiderata per l'angolo durante la fase di volo mediante un algoritmo PD di set point. Avendo due soli valori per le zampe anteriori e due per le zampe posteriori, questo controllore è determinato da soli quattro valori.

Con questa struttura di controllo è sorprendentemente possibile avere un robot mobile a quattro zampe servili senza bisogno di retroazioni per il controllo della velocità e dei momenti delle forze esercitate sui fianchi del corpo principale. Lo svantaggio sta nel fatto che questo tipo di controllore ha bisogno di tutti i quattro parametri che lo determinano per attivare ogni particolare velocità. Questo inconveniente può essere superato implementando una tabella che può servire anche in caso di fallimento di un sensore.

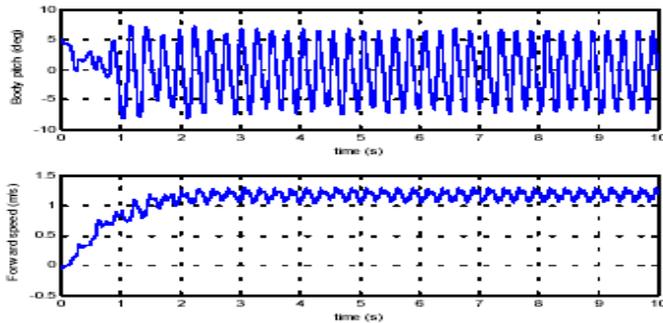
### ➤ ESPERIMENTI

Su Scout II sono stati effettuati alcuni esperimenti per testarne le prestazioni durante la locomozione.

In fase di simulazione a livello software, sono stati assegnati dei valori ai parametri del controllore per testare l'efficacia del controllo in anello aperto. I quattro parametri necessari per determinare il controllore sono due angoli e due momenti torcenti: per le zampe anteriori il valore del momento era di 10 Nm e l'ampiezza dell'angolo era di 22°; per le zampe posteriori i valori erano di 40 Nm per il momento dell'anca e di 18° per l'ampiezza dell'angolo. Il risultato della simulazione software ha mostrato che il robot può raggiungere la velocità di circa 1.2 m/s in un tempo che si aggira sui 2

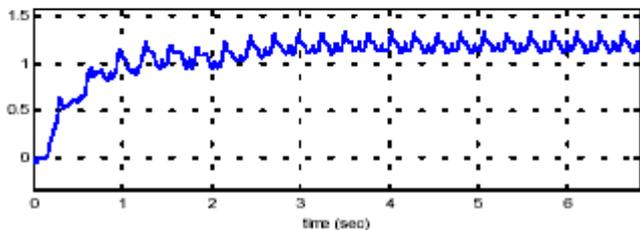
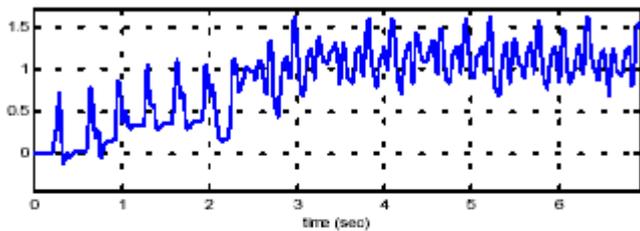
secondi, quindi con un'accelerazione di circa  $0.6 \text{ m/s}^2$ , partendo da fermo. Inoltre, il corpo principale subiva delle oscillazioni di ampiezza pari a  $6.5^\circ$  in un periodo di  $0.29 \text{ s}$ . Sono di seguito riportati i grafici che mostrano i risultati della simulazione software.

Il primo dei due grafici rappresenta le oscillazioni del corpo principale durante il moto dovute ai momenti torcenti che si creano sulle anche del robot. Il secondo grafico rappresenta la velocità del moto del quadrupede su di una linea retta. L'andamento inizialmente esponenziale va, nell'arco di due secondi, ad assestarsi su una retta alla quota di circa  $1.2 \text{ m/s}$ , velocità attualmente massima per il robot.



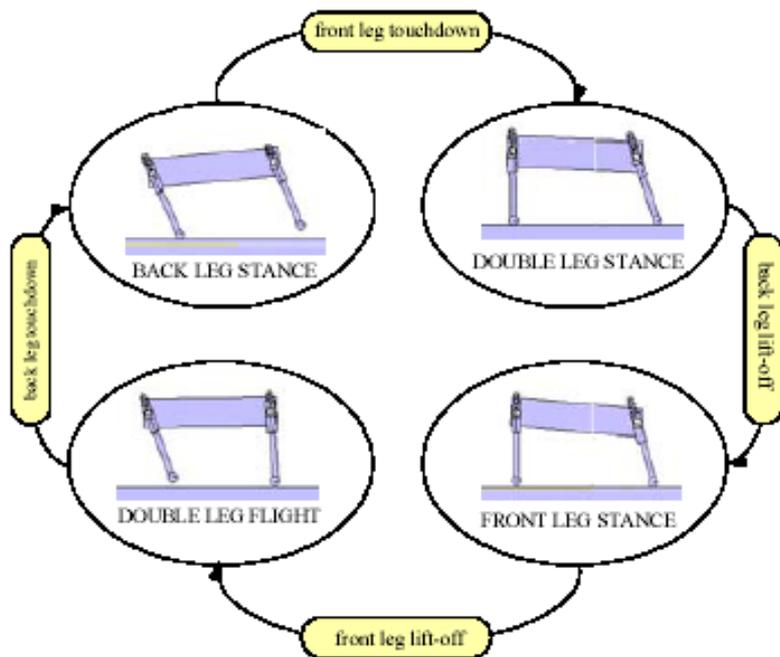
La simulazione ha posto le basi per effettuare un esperimento sul robot a livello fisico.

Si è, quindi, cercato di riprodurre nella realtà ciò che era stato studiato approfonditamente e simulato nella teoria. Sapendo di poter ottenere un'andatura saltellante stabile scegliendo un opportuno vettore di valori per i momenti delle forze generate dai motori durante la fase di posizionamento e per gli angoli delle zampe durante la fase di volo, è stato implementato un controllo in anello aperto con  $35 \text{ Nm}$  di torsione per le zampe posteriori e  $10 \text{ Nm}$  per quelle anteriori. Gli angoli di contatto con il terreno anteriori sono stati posti a  $22^\circ$  rispetto alla verticale, mentre per le zampe posteriori l'apertura era di  $18^\circ$ . Sia nella simulazione che nell'esperimento reale, è stato implementato un sistema per prevenire le scivolate da parte del robot. L'unica differenza tra la simulazione e l'esperimento sta nel fatto che in quest'ultimo il robot si assesta indipendentemente con le due zampe anteriori e le due posteriori. I risultati dell'esperimento reale sono confrontabili, a parte i primi tre secondi. Superata una prima fase in cui i due andamenti sono molto diversi, anche la velocità reale del quadrupede si assesta su  $1.2 \text{ m/s}$  circa. In entrambi i casi il robot partiva con una velocità pari a zero e raggiungeva la velocità massima.



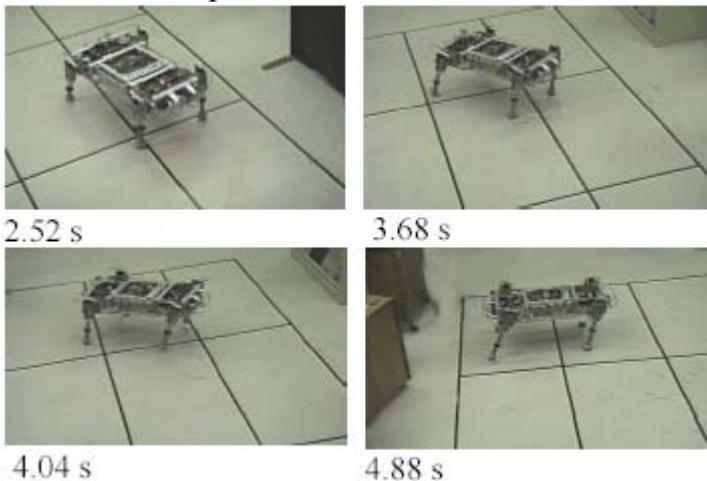
Nei due grafici riportati, si mette a confronto l'andamento della velocità reale e quello della simulazione rispetto al tempo. Si nota come la prima fase della simulazione sia molto più regolare rispetto allo stesso periodo dell'esperimento reale. Le ampie fluttuazioni della velocità sperimentale sono un artefatto dei calcoli effettuati basati sulle velocità angolari dell'anca che risentono dei cambi di velocità e delle trasmissioni di molti gradi.

Lo schema riportato di seguito rappresenta la sequenza ciclica dei movimenti compiuti dal robot durante la fase della locomozione. Dopo ogni transizione, il robot si trova in una nuova posizione. Esso muove separatamente e in modo indipendente prima le due zampe anteriori dando luogo ad una fase in cui esse non toccano il terreno, poi le due zampe posteriori dando vita allo stesso processo. Una volta raggiunto l'angolo di touchdown, ovvero l'angolazione alla quale le zampe devono avere il contatto con il piano d'appoggio, le due zampe attualmente interessate dal movimento toccano il terreno ponendo le basi affinché la stessa operazione si ripeta per le altre due zampe. L'angolo di touchdown viene stabilito dal controllore. Le due fasi che si alternano in questo processo sono la fase di volo, flight phase, e la fase di posizionamento, stance phase.



*Schema rappresentante la sequenza ciclica di operazioni compiute da Scout II durante la fase di locomozione*

Nel caso sperimentale è stata inoltre testata la capacità del robot di compiere un giro su se stesso. È bastato modificare leggermente l'algoritmo di controllo in anello aperto. Sono stati applicati due diversi vettori di momenti di forze dei motori sul lato destro e sul lato sinistro. Il robot è riuscito a ruotare su se stesso di 90° in un arco di tempo di circa 5 secondi. Si riporta di seguito una sequenza di immagini esplicative dell'ultimo esperimento descritto.



# • TEMPLATES E ANCHORS: MODELLI E IPOTESI NEUROMECCANICHE PER LA LOCOMOZIONE DI ROBOT A ZAMPE SUL TERRENO

## ➤ INTRODUZIONE

La locomozione è il risultato di interazioni complesse, pluridimensionali, non lineari e correlate dinamicamente tra l'organismo e l'ambiente che lo circonda e in cui si trova ad operare. Tipicamente, nel progetto di un sistema robotica, si è soliti fare riferimento a dei modelli, che sono detti *templates*, che semplificano notevolmente lo sviluppo delle macchine, risolvendo molti problemi di ridondanza dovuta al numero delle zampe, migliorando le sinergie e le simmetrie. Un template è il modello più semplice che possa descrivere la macchina che si vuole realizzare. Esso deve avere il minimo numero di parametri e di variabili atte a rappresentare il comportamento che ci si attende dal robot. In generale, quando si sviluppano progetti ispirati a forme animali, quindi con un numero relativamente elevato di zampe e, conseguentemente, di giunti e di dispositivi che possano fungere da muscolatura, ci si trova a confrontarsi con strutture che differiscono molto tra loro per numero di zampe, modello dello scheletro e postura che permette all'animale stesso di avere un'andatura stabile durante la locomozione. In questo caso, un template può semplificare molto lo sviluppo del progetto, almeno in una prima analisi, suggerendo le strategie di controllo necessarie per raggiungere i target prestabiliti. Queste strategie di controllo, infatti, possono subire un testing a priori, mediante strumenti tipicamente software, ma anche con l'utilizzo di semplici prototipi. Questo risulta essere un grande vantaggio per i progettisti in quanto i dati raccolti empiricamente possono essere valutati solo a posteriori, dopo aver effettuato uno sforzo per produrli con sperimentazioni sul campo. Un template può essere basato su numerosi dettagli morfologici e fisiologici dell'animale che si vuole riprodurre, rispondendo così a domande relative al numero di zampe, al numero e alla forma dei giunti nonché ai momenti torcenti applicabili ai giunti stessi che permettono di attuare le zampe, alle contrazioni muscolari che permettono tali momenti ed infine alle reti neurali che permettono di guidare tutto l'insieme. Questi modelli appena descritti risultano essere dei templates molto più dettagliati e complessi rispetto al modello minimo da cui si era partiti. Il nuovo modello prodotto viene definito *anchor*. Essi introducono dei dettagli biologici specifici che sono di interesse per il meccanismo di coordinazione. Dato che tali meccanismi richiedono controlli, gli anchors integrano ipotesi inerenti la maniera in cui l'energia o il movimento è spostato dalle zampe, dai giunti o dai dispositivi atti a riprodurre la muscolatura dell'animale, lasciando ai templates le specifiche riguardanti dettagli appartenenti ai precedenti gradi di libertà. Un obiettivo è fissare l'origine del controllo poiché i sistemi meccanico e neurale sono dinamicamente interrelati ed entrambi giocano un ruolo importante nel controllo di stabilità. Il controllo di un'andatura a bassa velocità o di un'andatura a frequenza variabile sembra di dominio unico del sistema neurale, mentre durante una

locomozione più rapida e cadenzata, il controllo sembra passare ed essere meglio eseguito all'interno del sistema meccanico.

La speranza e gli sforzi di ricerca attuali vertono sulla creazione di una nuova branca della scienza che si occupi di neuromeccaniche comparative.

L'approccio che viene utilizzato nello sviluppo di progetti relativi al mondo animale, quindi, abbraccia diversi campi della ricerca scientifica. Si cerca di migliorare le conoscenze attuali mettendo in pratica uno studio interdisciplinare volto alla progettazione e realizzazione di un sistema a zampe in grado di muoversi autonomamente. Nel far ciò, è necessario innanzitutto definire delle ipotesi sotto le quali sia possibile lavorare mettendo in pratica le idee di progetto.

Occorre chiarire ulteriormente la differenza tra templates ed anchors di cui si è già parlato. Essi sono entrambi utilizzati nello sviluppo di robot a più di due zampe, ma in momenti, circostanze e in modi diversi.

Un template è un modello che descrive e predice il comportamento di un corpo in relazione al raggiungimento di uno scopo prefissato. Si tratta di un modello realizzato trascurando qualsiasi dettaglio relativo alla complessità dei giunti, ai muscoli e alle reti neurali. Nonostante ciò, non è solo un modello molto semplificato del robot che si vuole realizzare, ma serve anche come guida o come obiettivo per il controllo della locomozione. Ad esempio, con un template è possibile individuare la velocità alla quale si verifica un cambio di andatura in diverse specie animali differenti l'una dall'altra per il numero delle zampe ed altri dettagli morfologici e fisiologici. Il template non contiene alcun dettaglio relativo alla meccanica del robot, ma ciò nonostante, diventa un elemento fondamentale nello sviluppo di progetti di questo tipo e quasi mai assume il ruolo di particolare trascurabile.

Oltre il modello appena descritto, nella progettazione di un robot dalla forma animale, si cerca anche un modello delle zampe, dei giunti, dei muscoli, della rete neurale e di come tutti questi componenti possano riuscire a integrarsi e collaborare per produrre una locomozione. A questo punto e a questo scopo inizia lo sviluppo di un anchor. L'anchor è un modello più realistico del precedente che si basa su dettagli morfologici e fisiologici dell'animale, quei dettagli che al livello di astrazione precedente erano stati trascurati. Un anchor non è, ovviamente, solo un modello più dettagliato dello stesso sistema, ma deve incorporare i particolari meccanici con il comportamento studiato nel rispettivo template. I principali vantaggi di questo modo di procedere nello sviluppo del progetto sono stati fatti studiando separatamente le varie parti che costituiscono l'insieme del sistema. Il passo successivo è rappresentato dall'obiettivo di integrare queste componenti.

#### ➤ IL TEMPLATE: LA SFIDA DI UN SISTEMA COMPLESSO E RIDONDANTE

Attualmente la scienza ingegneristica e la scienza naturale non sono in grado di definire un piano di design per la progettazione di un robot artropode capace di muoversi a velocità elevata ed essere manovrato. La ragione principale di questo handicap è stata già citata nel testo: la locomozione è un processo complesso dipendente da molteplici fattori, spesso non lineari, che sono correlati tra loro in

modo dinamico e, di conseguenza, risultano difficili da studiare off-line. Tali fattori sono dati soprattutto dalle interazioni che esistono tra l'organismo e il mondo in cui si muove.

I biologi non possono semplicemente prendere in prestito i modelli dalle scienze matematiche e ingegneristiche. I modelli appropriati sono disponibili sin dallo studio delle meccaniche classiche avvenuto nel diciottesimo secolo, ma la loro intrattabilità è stata stabilita per più di un secolo. Comporre le difficoltà, molti canali e ricettori di ioni in ogni neurone, molti neuroni, molte connessioni neurali, molti sensori interni ed esterni, molti giunti di vario tipo, molti muscoli, tutti operanti in un ambiente variabile in funzione del tempo, complica l'analisi. Il numero di punti di cui si ha bisogno o lo sforzo di calcolo cresce esponenzialmente con il crescere del numero delle dimensioni. In senso strettamente ingegneristico, i robot dalla morfologia animale sembrano essere costruiti in modo ridondante, o almeno completo, per il compito della locomozione soltanto.

Gli animali mostrano una ridondanza cinematica per la locomozione poiché essi possiedono molti più giunti, che conferiscono loro molti più dei tre gradi di libertà per la posizione del corpo e dei tre gradi di libertà per l'orientamento del corpo stesso.

Gli animali mostrano una ridondanza negli attuatori per la locomozione perché essi, spesso, hanno almeno il doppio dei muscoli come giunti e quindi come gradi di libertà.

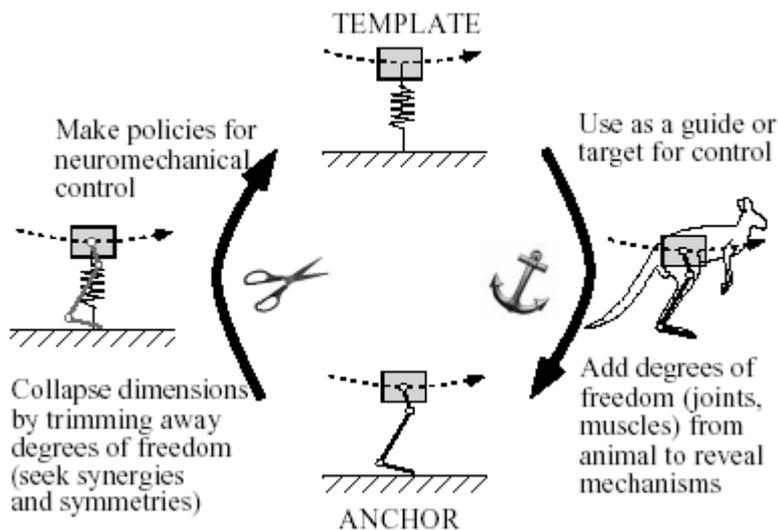
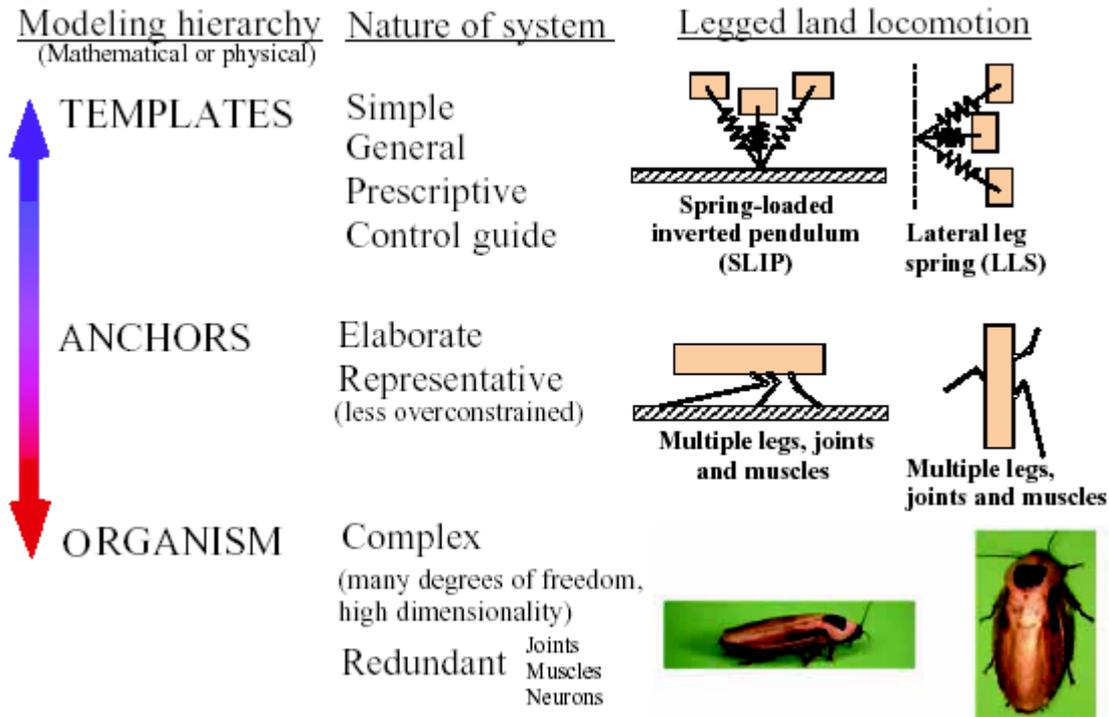
Gli animali mostrano una ridondanza neurale per la locomozione perché presentano molte più interazioni a livello delle reti neurali di quelle necessarie per generare i segnali che devono rendere possibile il movimento dei motori.

Una soluzione al problema della complessità è molto semplice nella sua idea primitiva, ma molto difficile da mettere in pratica. La maledizione della dimensionalità individuata da Bellman può essere spezzata da un template. Rispettando il principio del minimo numero di variabili e di parametri necessari, un template può avanzare ipotesi intrinseche concernenti la strategia di controllo da seguire per raggiungere lo scopo prefissato. Molti studiosi hanno osservato che le caratteristiche di un template portano vantaggi evidenti allo sviluppo dei progetti e permettono numerose scoperte riguardanti la locomozione delle varie tipologie di animali in un piano. Infatti, queste caratteristiche sono colte molto bene dal modello semplificato poiché si astraggono dalla struttura fisica dell'animale stesso. Il difetto del template, come anche delle simulazioni software, è che non riesce a tener conto dei disturbi e delle perturbazioni che possono verificarsi nella realtà. Nonostante ciò, i template e le simulazioni software forniscono informazioni importanti che devono essere valutate. Un anchor, un modello maggiormente dettagliato della struttura dell'animale, che tiene conto anche della sua fisiologia e della sua morfologia, non può sostituire il modello semplice, ma viene sfruttato appieno solo se integrato con il template ad esso sottostante.

Nella costruzione del template, il problema della ridondanza può essere risolto in larga parte ricercando delle sinergie e delle simmetrie. Per sinergia si indicano parti che lavorano insieme per il compimento di un'azione combinata o di

un'operazione. Neuroni, muscoli, zampe e giunti possono lavorare in concertazione come se fossero una sola cosa. L'importanza delle sinergie nella soluzione del problema delle ridondanze è stata riconosciuta sin dagli anni Trenta. Per simmetria si intende la corrispondenza, rispetto ad un piano che taglia immaginariamente il corpo in direzione longitudinale, di parti uguali sui due lati del corpo.

Secondo questa prospettiva, ci si potrebbe focalizzare su due tipi di template che sono oggi chiamati SLIP e LLS.



Due esempi del modo di utilizzo dei template e degli anchor

## ➤ L'ANCHOR: LA NECESSITA' DELLA NEUROMECCANICA

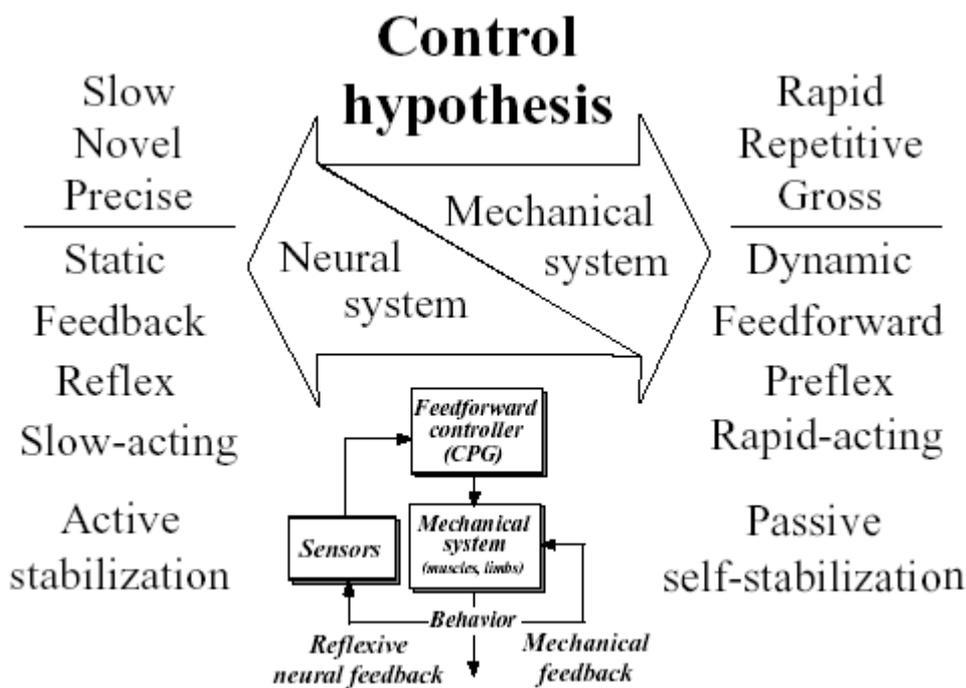
Come descritto, i template provvedono a fornire le strategie di controllo utili per realizzare il comportamento che ci si aspetta dal robot. Spetta agli anchors, invece, il compito di individuare le caratteristiche neurali e morfologiche e i dettagli muscolari del meccanismo. Gli anchors arricchiscono le informazioni derivanti dallo studio del template. Essi introducono aspetti neurali, di gruppi muscolari, giunti e zampe. Producono uno sforzo per cercare la massima corrispondenza tra il modello che si deve produrre e la realtà, la vera struttura dell'animale. Anche il più semplice anchor incoraggia l'integrazione di tutti i vari componenti del robot.

La coordinazione tra sistema neurale e meccanico richiede una grandissima attività di controllo.

Raibert, nel suo primo lavoro risalente al 1986, mostrò che è possibile ricondurre la locomozione di un robot quadrupede al modello SLIP, facendo riferimento ad una sola zampa. Più tardi, introdusse un giunto all'altezza della caviglia dell'animale nel suo modello. In questo modo, egli creò il modello di un robot saltellante ad una sola zampa. Recentemente, nel 1998, alcuni studiosi, tra i quali era Saranli, hanno proposto degli algoritmi che permettono di coordinare il movimento di un robot che abbia degli attuatori sulle caviglie, sulle ginocchia e sulle anche. Tutto ciò è stato fatto ancora una volta riferendosi al modello di robot ad una sola zampa introdotto da Raibert, con la possibilità di estenderlo ad un robot quadrupede. Il controllore prodotto da questi studi riceve comandi di alto livello, come la velocità di locomozione desiderata o il bilanciamento del peso, e permette di effettuare torsioni dei giunti che forzano il centro di massa delle caviglie, delle ginocchia e delle anche ad avere il comportamento previsto. In tutti i casi sperimentali effettuati, i gradi di libertà ridondanti per il compito che si vuole far eseguire al robot sono stati tolti dal controllore e trascurati secondo un principio che prende il nome di "trimming away". Il meccanismo virtuale risultante è modellizzato dalle dinamiche di un template. Il template contiene solo la complessità necessaria per codificare il compito di manovra del payload, il centro di massa del corpo durante la locomozione ad andatura elevata. I restanti gradi di libertà sono usati dall'anchor come particolare complemento della meccanica dell'hardware. Dunque, sebbene il quadrupede pensato da Raibert nel 1986 sia fondamentalmente differente dal monopode del 1998, entrambi possono essere usati come anchors dello stesso modello SLIP.

Il ruolo di controllore è stato sempre riservato al sistema nervoso. Raibert e Hodgins pensarono che la tradizione fosse da modificare poiché, secondo loro, in ogni sistema meccanico deve esistere una specie di mente in grado di dare ordini al corpo. Ciò significa che gli ordini di movimento o di effettuare altre operazioni non arrivano più direttamente al robot dal sistema neurale. Questo può solo proporre dei suggerimenti in relazione alla realtà fisica del robot che risiede in qualche modo nel sistema meccanico. Ovviamente, i sistemi meccanico e neurale, sono dinamicamente correlati, di conseguenza c'è bisogno di stabilire con precisione cosa deve essere controllato e dove deve avere origine il controllo. La realtà rende molto difficile questa identificazione poiché i due sistemi rivelano i loro fenomeni in spazi diversi e in tempi diversi. Basti pensare che i movimenti di un sistema meccanico sono visibili

ad occhio nudo nel macrospazio, mentre i fenomeni legati al sistema neurale non sono visibili dall'uomo senza l'ausilio di strumentazioni adeguate. Inoltre, questi ultimi avvengono in modo molto più veloce dei primi. Nei casi in cui la locomozione è molto lenta sono stati fatti dei tentativi parzialmente riusciti di integrazione. La natura della strategia di controllo sembra dipendere dal compito di locomozione, dalla sua ritmicità e dalla sua velocità. Per esempio, durante una locomozione lenta, a frequenza variabile, si richiede una continua e precisa scansione da parte del sistema neurale, che, in questo caso sembra dominare il controllo del movimento del robot per mezzo di un continuo feedback.



*Ipotesi di controllo neuromeccanico. Il controllo può dipendere dal compito da svolgere oppure dall'intensità. La parte sinistra della figura mostra come il controllo avveniva tradizionalmente all'interno del sistema neurale, per mezzo di un continuo feedback proveniente dal sistema meccanico ed eventualmente dal sistema sensoriale. La parte destra dello schema si focalizza sul controllo effettuato dal sistema meccanico durante un'attività maggiormente veloce e ritmica rispetto a quella rappresentata nella sezione precedente.*

## • **LOCOMOZIONE SU TERRENI NON PIANI**

### ➤ **INTRODUZIONE**

La maggior parte delle superfici della Terra risulta inaccessibile a macchine in grado di muoversi soltanto in terreni strutturati e piani. Per questo, si avverte la necessità di progettare robot mobili che siano capaci di trattare la locomozione su terreni e superfici più complesse, che presentano numerose difficoltà relative alla loro struttura e alla loro conformazione fisica. Attualmente, i robot che sono stati costruiti in tempi recenti sono in grado di muoversi soltanto su superfici lisce, al più inclinate di una certa angolazione. A questo punto, ci si propone, quindi, di discutere i differenti sistemi mobili che possono essere utilizzati per affrontare la locomozione su terreni, cosiddetti, difficili. Ovviamente, saranno considerati soltanto robot che basano il loro movimento sul contatto diretto con il terreno, trascurando quei dispositivi che si muovono nell'aria o in acqua.

I terreni considerati comprendono sia situazioni che possono verificarsi all'aria aperta, sia condizioni riguardanti problematiche interne ad un edificio. Della prima categoria fanno parte terreni non lisci, aree desertiche oppure zone di ghiaccio, nel secondo caso si ricordano, ad esempio, scalinate, gradini di ingresso alle porte di alcune stanze, angoli. Quelle menzionate sono tutte situazioni in cui un robot può trovarsi in difficoltà nel momento in cui le incontra sulla sua traiettoria. La necessità di studiare la locomozione in questo tipo di aree nasce dal fatto che oggi i robot hanno molteplici utilizzi e applicazioni che possono a volte essere eseguiti su questi particolari tipi di terreno. I robot vengono, infatti, usati in agricoltura, nell'esplorazione interplanetaria, negli interventi in zone colpite da incendi, nell'esplorazione di aree contaminate da scorie radioattive o da sostanze velenose nocive per l'uomo, nella ricognizione in zone disastrose da calamità naturali, nella costruzione di edifici su siti di vario genere.

Sebbene i veicoli a ruote e quelli cingolati siano i più utilizzati su terreni difficili, esistono un gran numero di soluzioni diverse che possono essere attuate in problemi di questo genere. I principali sistemi di locomozione si possono dividere in alcune categorie, tra le quali si ricordano i robot a ruote e i robot cingolati già citati, i robot a zampe, i robot articolati e ibridi che sono combinazioni delle diverse soluzioni precedentemente indicate. In realtà, esistono ancora altre forme di robot mobili capaci di adattarsi a terreni difficili, ma sono utili soltanto in casi molto particolari e non verranno, quindi, trattate ora.

### ➤ **COSA SI INTENDE PER TERRENO DIFFICILE**

Un punto fondamentale dell'argomento che si sta trattando è chiarire senza ambiguità cosa si intende per terreno difficile. Infatti, è molto complesso individuare la differenza tra un terreno difficile ed uno facile, poiché la difficoltà o la semplicità con la quale si può affrontare la locomozione su un particolare terreno dipende anche

da fattori propri del robot considerato, come ad esempio la sua grandezza o il suo sistema meccanico utilizzato per il movimento. Se ci si riferisce ad un terreno difficile nel modo in cui possono intenderlo degli esseri umani, allora si può pensare, come esempi esplicativi, a terreni di tipo desertico o artico, terreni scivolosi o fangosi o ancora a terreni rocciosi. In realtà, il concetto di difficoltà di un terreno, per un robot assume un significato diverso: anche dei terreni che si trovano all'interno di edifici normalissimi per un essere umano possono diventare difficili per il movimento di un robot, poiché tali aree sono state pensate per la locomozione di bipedi. Il grado di difficoltà del terreno dipende, quindi, dal particolare dispositivo che deve muoversi su tale terreno. Con le conoscenze oggi a disposizione, sono stati costruiti robot che sono già di grande utilità all'interno di ambienti strutturati e pensati per il loro compito, ma davvero pochi robot sono in grado di adattarsi a terreni e ambienti poco strutturati.

Le proprietà che possono rendere complesso un terreno sono numerose. Per prima cosa, si riscontrano delle proprietà geometriche del terreno che ne individuano la forma e l'inclinazione. Può trattarsi di terreni ruvidi o lisci, piani oppure in salita o discesa. Queste proprietà comprendono anche la presenza di ostacoli sulla superficie, come buche, gradini o dossi. Si incontrano, poi, le proprietà del materiale di cui il terreno è costituito. Con ciò si intende la sua consistenza, l'attrito, la densità, ecc. Infine, si trovano le proprietà temporali. Con queste proprietà si cerca di descrivere il tempo che impiega il terreno per cambiare il suo aspetto. Questa caratteristica può influenzare entrambe le precedenti, geometriche e materiali.

In molti casi possono verificarsi dei fallimenti e degli errori da parte del robot. Questi inconvenienti sono dovuti a molteplici cause. Molte volte può accadere che le parti meccaniche del robot abbiano dei giochi a livello dei giunti che tengono uniti due link. Questo può diventare un problema quando il link interessato urta con una certa forza il terreno. Le vibrazioni che la macchina subisce a causa delle variazioni proprie del terreno costituiscono un altro motivo d'errore. Esse, infatti, possono causare danni all'equipaggiamento e alla meccanica del robot. causare danni all'equipaggiamento e alla meccanica del robot.

Il fallimento della stabilità può avvenire quando il robot incontra sulla sua traiettoria inclinazioni troppo ripide o assume una velocità troppo alta per il tipo di terreno sul quale si muove. In questi casi, tali difficoltà possono provocare il ribaltamento del veicolo.

Talvolta può verificarsi il fallimento della trazione. Questo accade quando il robot si trova a muoversi su terreni ghiacciati o scivolosi in genere. L'attrito tra le zampe del robot ed il terreno, in questi casi viene meno e di conseguenza il robot non riesce a progredire nella sua locomozione.

Per evitare questi fallimenti, è necessario classificare il terreno secondo l'abilità che il robot possiede di muoversi su di esso. Questo equivale ad aiutare il guidatore, che può essere umano o automatico, ad identificare le difficoltà e determinare un percorso appropriato per la locomozione su un dato terreno.

## ➤ LA SCELTA DEL SISTEMA DI LOCOMOZIONE

Il primo passo da eseguire per raggiungere lo scopo prefissato di un movimento stabile e senza alcun tipo di fallimento è la scelta del sistema di locomozione. Bisogna, quindi, analizzare diversi sistemi di locomozione per identificarne le capacità, come velocità e stabilità, in relazione al terreno sul quale il robot dovrà muoversi. Ovviamente, le differenti soluzioni propongono diverse caratteristiche, proprietà e costi che vanno valutati nel loro insieme, individuando i trade-off da rispettare e scegliendo, in ultima analisi, il sistema mobile più appropriato e vantaggioso rispetto ai compiti che si vogliono far svolgere alla macchina.

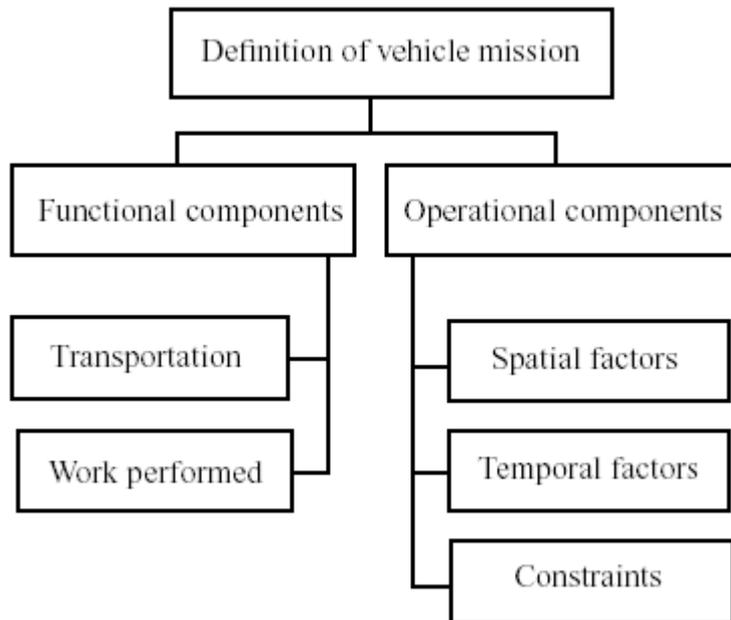
Il terreno con le sue proprietà fisiche può influenzare la scelta in molti modi.

Se si considerano terreni scivolosi e cedevoli, la scelta migliore sarà, probabilmente, data dall'utilizzo di robot mobili dotati di cingoli, poiché essi basano il loro movimento su un ampio contatto con la superficie del terreno, riuscendo così ad aumentare l'attrito con esso e ridurre, quindi, lo scivolamento dovuto al ghiaccio o alla sabbia di cui si costituisce la superficie.

Nel campo industriale, sono molto utilizzati robot mobili dotati di ruote, tipicamente, sei o otto ruote disposte simmetricamente rispetto al corpo della macchina. Essi hanno migliori prestazioni dei cingolati su terreni non lisci, ma numerosi esperimenti vengono effettuati anche con robot a zampe che sembrano ottenere ottimi risultati sugli stessi tipi di terreno.

Su terreni fangosi, la scelta ideale sembra ricadere su robot a zampe che meglio rispettano le specifiche di comportamento attese di quanto riescano a fare gli altri tipi di sistemi di locomozione. In particolare, quando il compito del robot è di monitorare una determinata situazione, i cingolati e i robot a ruote hanno difficoltà a gestire le telecamere di cui sono dotati, mentre molto migliore è la risposta dei robot a zampe a questo tipo di problema.

Un altro argomento da considerare per la scelta del sistema di locomozione è la missione che si vuole far compiere al robot. Il compito che si vuole far svolgere al robot si dice *mission statement* e rappresenta lo scopo della locomozione. Secondo Bekker, si può dividere in caratteristiche funzionali e caratteristiche operazionali, come descritto dalla seguente figura.



*Caratteristiche ed elementi del mission statement definiti da Bekker nel 1969.*

Nelle caratteristiche funzionali si specifica se il robot deve essere usato per particolari scopi come il trasporto o l'esplorazione.

Le caratteristiche operazionali specificano la mobilità, le variazioni dell'ambiente e del terreno, il costo, il peso, ecc.

Per il trasporto, il peso e la grandezza del carica hanno bisogno di essere descritti o stimati. Il comportamento di un robot trasportatore può cambiare drasticamente in dipendenza del massimo payload che può sopportare. Si deve considerare, quindi, l'equipaggiamento del robot in relazione ad un particolare scopo.

Le caratteristiche operazionali sono spesso più difficili da analizzare poiché, per esempio, la dimensione spaziale e quella temporale sono strettamente interrelate tra loro e la velocità della locomozione dipende, tra gli altri fattori, dalle caratteristiche fisiche del terreno su cui il movimento deve avvenire.

#### ➤ LOCOMOZIONE A ZAMPE

Tralasciando i particolari relativi a tutti gli altri tipi di locomozione, ci si concentra ora sulla soluzione della locomozione a zampe.

Già da circa cento anni, si effettuano ricerche sui veicoli che utilizzano un sistema di locomozione a zampe. Il motivo principale di questa persistenza è che la maggior parte dei terreni esistenti sulla terra sono inaccessibili a robot che usano un sistema di locomozione a ruote o a cingoli, mentre gli unici robot che possono rispondere correttamente al problema sono quelli che usano un sistema di locomozione a zampe.

Raibert affermò che i robot a zampe risultano migliori di quelli a ruote o a cingoli nella locomozione su terreni particolarmente difficili perché questi ultimi hanno bisogno di un continuo contatto con il terreno. I robot a zampe, invece, possono avere un'ottimizzazione di supporto e trazione su ognuna delle zampe e sopperire con più semplicità alle difficoltà imposte dai terreni.

I vantaggi della locomozione a zampe su terreni difficili sono numerosi. Sono adatti alla locomozione su terreni particolarmente irregolari per le ragioni descritte in precedenza, utilizzano punti di appoggio singoli per ogni zampa, sono forniti di sospensioni attive, gli effetti dell'ambiente su di essi sono meno evidenti di quanto non lo siano per gli altri tipi di locomozione.

Ovviamente, avendo precedentemente parlato di trade-off da valutare, esistono anche degli svantaggi. Infatti, il meccanismo che permette il movimento deve essere dotato di un gran numero di attuatori, il controllo della locomozione risulta molto complicato e i veicoli sono spesso molto lenti, hanno un rapporto payload-peso/meccanismo-peso peggiore rispetto agli altri tipi di sistemi di locomozione, soffrono di un forte impatto ad ogni passo.

Ponendo grande attenzione ai meccanismi di movimento, si descrive ora più in particolare la locomozione a zampe. Come si è già detto, i robot di questo genere hanno un appoggio non continuo con il terreno e utilizzano ottimizzazioni e trattamenti delle varie situazioni a livello di ciascuna delle zampe. Molti progetti sono ispirati alle caratteristiche biologiche degli animali sia nella configurazione delle zampe, sia nel design delle zampe stesse. Questo porta molto di frequente ad una semplificazione dello schema biologico reale che ha un grandissimo numero di gradi di libertà, spesso ridondanti, che sarebbe molto difficile e troppo dispendioso, oltre che superfluo, riprodurre meccanicamente. Le cosiddette walking machines sono classificate a seconda del numero delle zampe. Le più comuni sono: ottapodi, robot con otto zampe, somiglianti a ragni ed altri insetti, esapodi, robot con sei zampe, quadrupedi, robot somiglianti a molti animali mammiferi e marsupiali, bipedi, robot con due zampe aventi un aspetto umanoide, di uccelli oppure di canguri.

#### ➤ LA CONFIGURAZIONE DELLE ZAMPE E IL LORO DESIGN

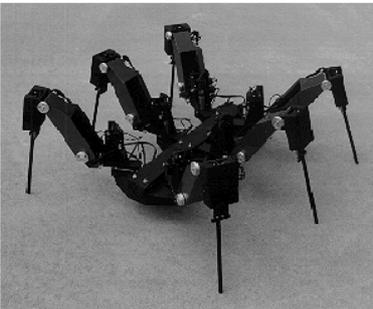
La configurazione delle zampe descrive come le zampe sono disposte intorno al corpo e collegate ad esso. Questo influisce sulla stabilità del robot e sullo spazio di lavoro delle sue zampe. Esistono innumerevoli configurazioni possibili delle zampe, ispirate spesso alla struttura di alcuni animali.

Il primo modello è quello somigliante alla configurazione fisiologica di umani e uccelli, in cui le zampe ruotano intorno ad un asse orizzontale. Le zampe sono in linea con il corpo e i piedi sono posizionati nei pressi della proiezione su un piano orizzontale del centro di massa del corpo.



*Esempio di robot dal modello descritto sopra con utilizzo in terreno irregolare*

Il secondo esempio è relativo a robot la cui struttura fisica è ispirata a quella di alcuni insetti, con le zampe che ruotano attorno ad un asse più verticale. Il corpo del robot ha una posizione sdraiata e le zampe che ne escono non appoggiano immediatamente sotto di esso, ma il supporto avviene al di fuori della proiezione su un piano orizzontale del centro di gravità. Questa caratteristica rende il modello in questione molto stabile. Questa configurazione è molto comune per robot con molte zampe, quali esapodi e quadrupedi.

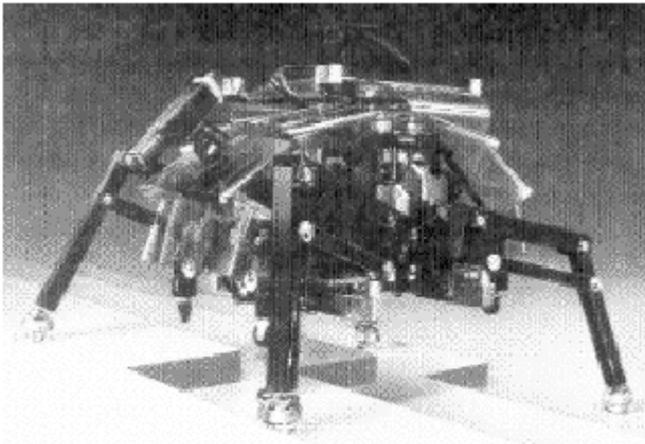


*Progetto di un insetto artificiale dal modello descritto sopra*



*Attila, progettato e realizzato al MIT*

Molte configurazioni hanno le zampe disposte simmetricamente lungo un asse nella direzione del movimento. In molti casi, però la simmetria può essere ottenuta mediante l'utilizzo di più assi di simmetria, tipicamente due assi.



*Robot con più assi di simmetria per la configurazione delle zampe.  
Realizzato all'università di Tokio*

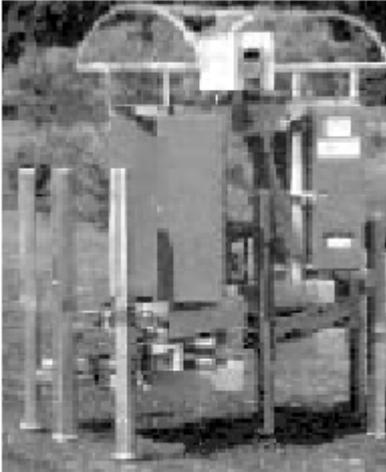
Molte altre importanti configurazioni delle zampe dei robot non hanno una vera e propria ispirazione biologica.

I Frame Walkers sono dei dispositivi costituiti da due corpi che possono scivolare l'uno sull'altro ed ognuno di essi ha un set di zampe attaccato. Il numero delle zampe di ogni set deve essere almeno tre per garantire una stabilità statica. Le zampe di un frame forniscono un supporto nel momento in cui le zampe dalla parte opposta vanno spostate in avanti. Allo stesso modo viene poi spostato il frame e simmetricamente si ripete lo stesso movimento per la parte opposta in modo da ottenere una locomozione regolare.

I Circulating Walkers sono dei sistemi di locomozione in cui le zampe sono sistemate su due pile e ruota lungo l'asse verticale di ognuna delle due pile. Le due pile sono connesse da un corpo di forma arcata. Quando avviene il posizionamento di una nuova zampa, una delle zampe posteriori viene spostata e ruotata in avanti.



*Un esempio di Frame Walker*



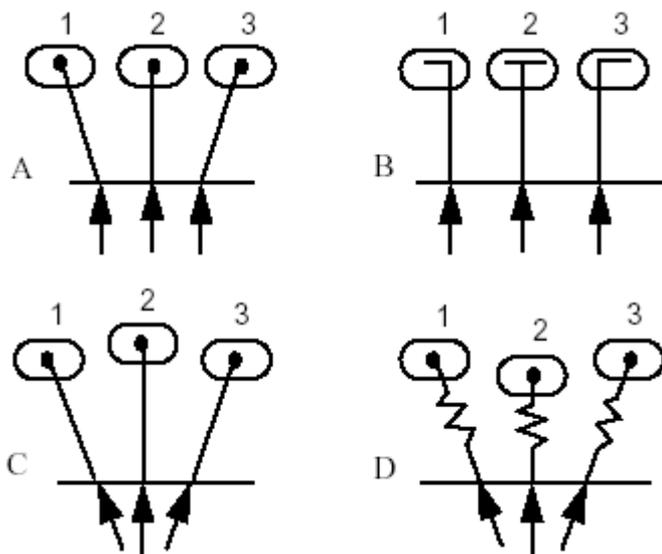
*Un esempio di Circulating Walzer*

I Weaving Walkers sono molto simili ai precedenti, ma hanno zampe in grado di ruotare sotto, sopra o tra altre zampe.

Avendo analizzato le diverse configurazioni che le zampe di un robot possono assumere, ci si sposta ora verso l'analisi della struttura delle zampe stesse. Tutti gli animali possiedono zampe composte, con termini tecnici, da link e giunti. Nella maggior parte dei casi il numero dei gradi di libertà delle zampe di animali va da un minimo di due ad un massimo di quattro. In generale si incontrano robot che hanno tre gradi di libertà, poiché questa soluzione risulta utile nei vari usi che si possono fare del robot e di relativamente facile realizzazione. Permette inoltre una buona collocazione nello spazio a tre dimensioni. Il problema principale della costruzione di zampe è la scelta dei punti in cui vanno posizionati degli attuatori. Se il peso e il momento di inerzia crescono, si ha bisogno di un motore più forte per muovere la zampa che durante il movimento aggiunge ancora peso. Esistono diverse tecniche per evitare gli inconvenienti descritti. Un pantografo è un semplice modo di avere una zampa con un giunto in posizione di ginocchio per poter ridurre il peso della zampa stessa. Nel 1984, Hirose introdusse il pantografo a gravità disaccoppiata, in cui due attuatori lineari sono disaccoppiati allo scopo di svolgere un lavoro orizzontale e verticale che trasla il piede in direzione orizzontale o verticale in funzione di come l'attuatore è utilizzato.

Un'altra soluzione può essere rappresentata dall'eliminazione del giunto al ginocchio con l'introduzione di un giunto prismatico che rende la zampa telescopica. L'accorciarsi può essere vista come l'equivalente di una curvatura di un ginocchio di una zampa articolata.

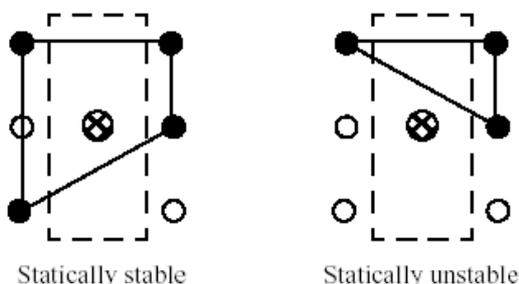
Molti progettisti provano a minimizzare le oscillazioni del corpo per rendere la guida quanto più scorrevole possibile. Comunque, gli animali danno la possibilità al loro corpo di oscillare durante la locomozione come un'opportunità di immagazzinare energia. Secondo Alexander ci sono quattro modelli alternativi per il movimento delle zampe (1990). Questi modelli sono descritti nella figura.



### ➤ LA STABILITA' DEI ROBOT A ZAMPE E LE LORO ANDATURE

La stabilità di robot a zampe può essere divisa in due parti: stabilità statica e stabilità dinamica. Stabilità statica significa che il robot è stabile durante ogni istante del ciclo di gait. Un ciclo di gait si conclude quando tutte le zampe sono state riposizionate.

Stabilità dinamica significa il robot mantiene l'equilibrio come nella guida di una bicicletta. Essa richiede un'attuazione attiva per mantenere il bilanciamento del peso. Questo richiede un grande e importante lavoro da parte del sistema di controllo, ma i vantaggi risultano subito evidenti. Un modo per evitare il venir meno della stabilità è di dotare il robot di piedi tali da fornire un ulteriore supporto all'equilibrio. Infatti, una particolare forma del piede può aiutare a sostenere il robot anche nei casi in cui il centro di massa, proiettato sul piano orizzontale, si trova al di fuori dell'area coperta dal poligono descritto dai punti in cui il robot appoggia. Questa soluzione è spesso utilizzata nei robot a due zampe che di frequente presentano problemi di stabilità.



*Se il centro di massa esce dal poligono descritto dalle zampe, il robot non è staticamente stabile*

L'andatura di un animale, come quella di un robot, è un insieme di movimenti coordinati che permettono di ottenere una locomozione. Essa può dipendere da

diversi fattori e ogni animale può averne diverse. Caratteristiche importanti di un'andatura sono la velocità e il numero di zampe utilizzate.

Un quadrupede, avendo un numero relativamente alto di zampe, può avere numerose andature differenti. Un'andatura è staticamente stabile se ogni zampa è mossa in modo tale che il centro di massa rimanga all'interno del poligono, in questo caso del quadrilatero, di supporto. La stabilità dinamica può comprendere un gran numero di andature come il trotto, il galoppo e l'andatura saltellante. Il trotto si realizza facendo muovere le zampe diagonalmente opposte contemporaneamente, mentre l'andatura saltellante si ottiene muovendo insieme alternatamente le zampe anteriori e quelle posteriori. Queste andature sono maggiormente usate da animali come cavalli e gatti. Un altro tipo di andatura può essere ottenuta facendo muovere contemporaneamente le zampe dallo stesso lato del robot come fanno cammelli ed elefanti.

Quattro è il minimo numero di zampe necessarie per ottenere una stabilità statica senza l'ausilio dei piedi. Per avere un'andatura staticamente stabile si ha bisogno che il centro di massa del robot non esca dal poligono di supporto, mentre si possono avere con i quadrupedi andature dinamicamente stabili come il trotto e il galoppo.

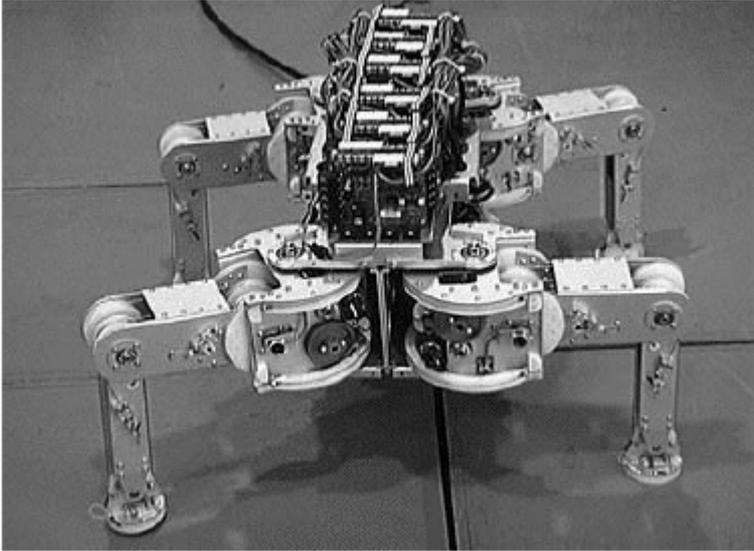
Molte ricerche su robot a quattro zampe sono state fatte presso il laboratorio di Tecnologia di Tokio da Hirose ed altri a partire dal 1976. Sono stati costruiti lì molti robot tra i quali, nel 1980, uno che utilizzava pantografi tridimensionali che traducevano il movimento di ogni attuatore in una serie di coordinate cartesiane. Ciò semplificava la soluzione del problema cinematica e riduceva le necessità di calcolo da parte del computer. Usando semplici algoritmi, il robot poteva evitare ostacoli di diversi tipi senza difficoltà, come affermato da Hirose nel 1984.

A partire da questo primo esempio, questi studiosi realizzarono poi una lunga serie di quadrupedi.

Titan III e Titan IV utilizzavano entrambi dei pantografi e Titan IV poteva passare automaticamente da un'andatura staticamente stabile ad una dinamicamente stabile, raggiungendo la velocità massima di 0.4 m/s.

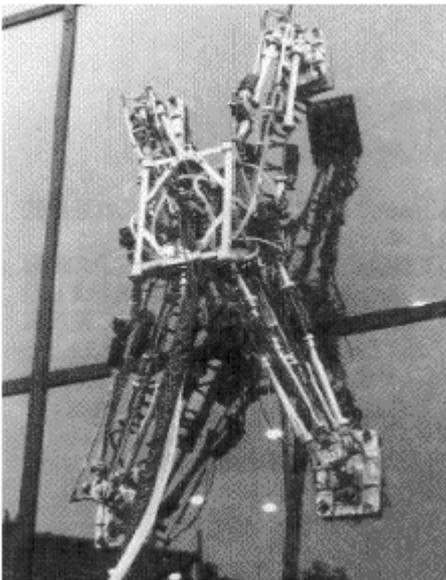
Titan VI utilizzava zampe prismatiche e poteva correre su terreni piani raggiungendo velocità massime di un metro al secondo. Inoltre, poteva salire le scale con un'inclinazione di 40 gradi.

Titan VIII usa motori situati all'inizio delle zampe, sull'anca del robot per attuare i giunti posti alle ginocchia. Riesce a raggiungere una velocità massima di 0.9 m/s.



*Titan VIII, realizzato all'Istituto di Tecnologia di TOKIO*

Ninja I e Ninja II sono in grado di arrampicarsi sui muri. Usano giunti di tipo prismatico ed hanno sotto ai piedi degli strati di materiale adatto allo scopo di attaccarsi alle superfici.



*Ninja I, realizzato da Hirose e altri, mentre si arrampica su una parete a vetri*

Per concludere la trattazione, si riporta una tabella che rappresenta i principali vantaggi e svantaggi dei diversi tipi di locomozione.

Sulle righe si hanno le varie caratteristiche dei terreni descritti durante tutto il paragrafo, le varie caratteristiche relative ai sistemi di locomozione che sono posti sulle colonne. In tabella si ha, quindi, una specie di giudizio di ognuno dei sistemi di locomozione, a ruote, cingolata, a zampe, ibrida e articolata.

	<b>Wheels</b>	<b>Tracks</b>	<b>Legs</b>	<b>Articul.</b>
Soft ground	o	+	o	+
Rough ground	+	o	++	+
Speed	+	o	-	o
Agility	+	o	+	+
Stability	o	+	+	-
Adaptability	o	-	+	+
Complexity	+	+	-	-
Payload	+	+	-	o
Efficiency	+	o	-	-
Reliability	+	o	-	-
Fault tolerance	o	o	+	+
Environmental effects	o	-	+	o

Con quanto detto finora si è voluto mettere in evidenza l'importanza che assume il controllore nella gestione di una locomozione per robot a quattro zampe. Trattandosi di robot mobili, nasce la necessità di conferire loro una certa autonomia. Il problema diventa più complesso di quanto lo sia per i robot industriali, i quali sono controllati in modo assoluto dall'operatore umano. Un robot mobile deve essere capace di muoversi nel mondo in cui si trova, quindi deve essere in grado di percepirlo e di prendere decisioni in relazione ai suoi mutamenti. Per quanto riguarda la modellizzazione del mondo, si possono effettuare diverse scelte. È possibile non rappresentare nulla di esso e controllare il robot sotto ogni aspetto, come accade per i manipolatori. Si può rappresentare il mondo corrente, cioè ciò che il robot vede attualmente, introducendo un controllo relativo che si basa sullo stato presente dei sensori interni ed esterni. È, inoltre, possibile modellizzare il necessario del mondo, in modo che si possa far svolgere il compito voluto al robot con le sole informazioni che gli sono passate. In questo caso si possono avere due diversi approcci: Subsumption e Motor Schema. Nella Subsumption si combinano diversi tipi di comportamento possibili da parte del robot e si fa in modo che ognuno di essi prenda il controllo al momento opportuno. Nel Motor Schema c'è ancora una combinazione di comportamenti, ma le uscite di ognuno di essi vengono sommate in ogni caso per averne un comportamento risultante. Infine, si può rappresentare quanto più possibile del mondo in cui il robot opera, attuando una soluzione del tipo SPA (sense-plan-act). Questa soluzione è stata la prima ad essere studiata nella robotica. Il robot avverte ciò che accade intorno a sé grazie all'ausilio dei sensori, di conseguenza pianifica le operazioni successive da compiere e le mette in pratica. Quest'ultimo approccio per la modellizzazione dell'ambiente prevede che avvenga un reasoning sulle informazioni sensoriali e su ciò che si conosce del mondo.

Si analizzeranno ora delle soluzioni studiate relative al problema del controllo su robot a zampe.

# • UN APPROCCIO CEREBRALE ALLA LOCOMOZIONE DI ROBOT A ZAMPE

## ➤ INTRODUZIONE

Ci si propone ora di descrivere un'architettura di apprendimento neurale per robot a zampe, ispirata alla neurofisiologia dei mammiferi. Gli studi biologici mostrano che il cervello è una parte fondamentale per un sistema di controllo adattativo che permette ai mammiferi di avere una notevole coordinazione durante la locomozione.

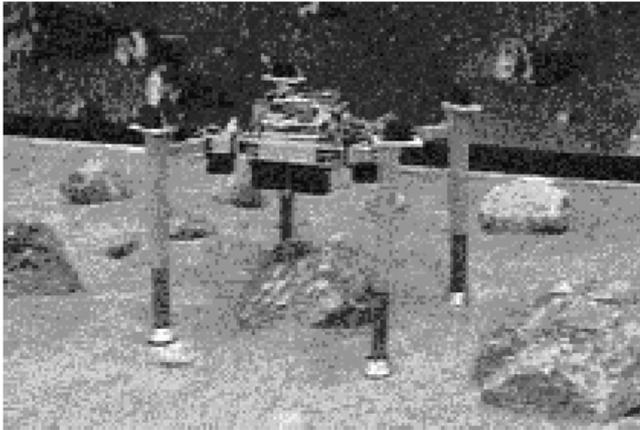
Lo sviluppo di un robusto controllore per la locomozione di robot a zampe è un problema molto complesso a livello ingegneristico. Esso deve poter soddisfare diversi criteri di valutazione: deve controllare il posizionamento dei piedi, i motori dei vari giunti, il mantenimento di una postura corretta e di un'andatura stabile. È di grande interesse lo sviluppo di un sistema di apprendimento che ottimizzi diversi tipi di andature. A questo scopo, si prende ispirazione dagli animali e si nota come in essi una parte fondamentale del controllo sia svolta dal cervello. È stata, quindi, sviluppata un'architettura di controllo adattativo della locomozione per robot a zampe basata su divisioni di controllo, come accade nel sistema nervoso di molti mammiferi. Componenti fondamentali di quest'architettura sono: un generatore di pattern centrale, un pianificatore di andature e un ottimizzatore neurale di andature. Il focus è stato posto su quest'ultimo componente che integra anche capacità di apprendimento e altri meccanismi ispirati al cervello.

## ➤ CERVELLO E LOCOMOZIONE

Molte teorie sul cervello affermano che esso può essere assimilato ad un sistema di controllo adattativo. Nella locomozione, il cervello influenza la coordinazione tra gli arti, il tempo del passo, i riflessi della muscolatura. Molte recenti ricerche della robotica vanno nella direzione del controllo adattativi e in questo progetto è stata seguita l'idea di Houk secondo cui il cervello impara quasi-feed-forward modelli di controllo che combina con i comandi dei motori dalla corteccia cerebrale. L'input sensoriale attiva un set di generatori dei modelli dei motore le cui dinamiche interne poi determinano il modello del motore indipendente dall'input successivo.

## ➤ IL MODELLO DEL ROBOT

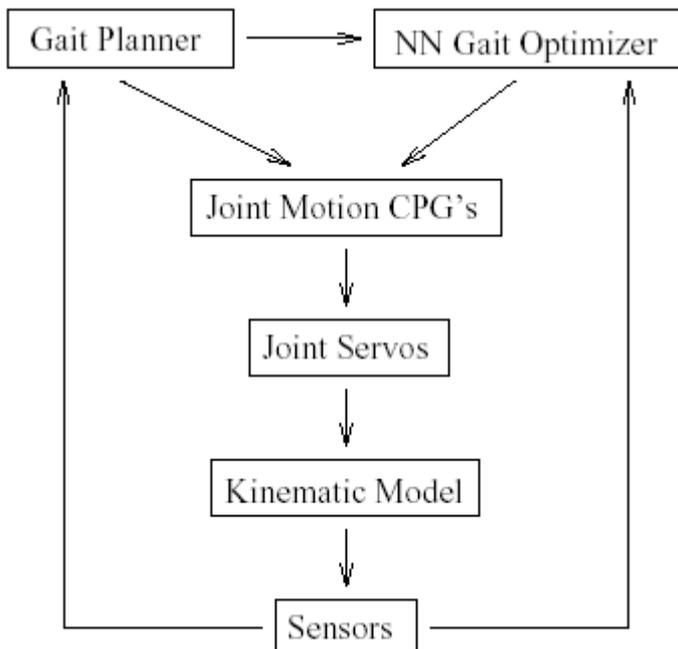
Il robot su cui questi algoritmi sono stati testati si chiama Meno ed è ritratto nella seguente figura.



*Meno, robot a quattro zampe usato come modello cinematica di base*

Meno è un robot a quattro zampe che è stato usato come modello cinematica di base. Ognuna delle zampe di Meno ha due giunti di rotazione ed uno prismatico, per un totale di dodici gradi di libertà sulle quattro zampe. I giunti rotazionali servono per controllare il movimento orizzontale, mentre quello prismatico serve per il controllo del movimento verticale.

Come già osservato, l'architettura di controllo di questo robot si basa sulle divisioni funzionali esistenti nella neurofisiologia dei mammiferi. In figura sono rappresentati schematicamente i suoi componenti principali.



*Architettura di controllo del robot*

Il generatore centrale di modelli (CPG) fornisce il controllo di base del motore per il movimento dei giunti similmente a quanto accade nei sistemi spinali e nei sistemi

cerebrali dei mammiferi. Le funzioni che sono attribuite alla corteccia cerebrale, come il raggiungimento del goal della locomozione e il controllo del posizionamento dei piedi, sono assegnate al gait planner. L'ottimizzatore di andatura modula gli output per correggere eventuali effetti non precisi da parte del CPG relativi alla pianificazione dei movimenti dell'andatura. In questo modo si integrano alcune delle funzioni ipotizzate del cervello nel controllo adattativo della locomozione.

I servomotori in questo modello sono un'approssimazione dei servomotori elettrici comunemente utilizzati in robotica per il controllo in posizione. Dato che un servomotore risponde continuamente alla posizione dell'obiettivo da raggiungere, esso implementa semplicemente un punto di equilibrio del controllo. Questo ci permette di descrivere le traiettorie dei giunti come un set di posizioni intermedie di essi.

#### ➤ IL GENERATORE CENTRALE DI MODELLI

In modo analogo ai sistemi biologici, il modello in questione ha un meccanismo per la generazione di modelli di base dei movimenti dei giunti per l'andatura di camminata. Si è scelto di implementarlo come una tavola di angoli obiettivo dei giunti, avendo precedentemente calcolato la cinematica inversa per via analitica. L'andatura di base consiste di un ciclo di punti di via per muovere ogni piede del robot lungo una retta traiettoria all'indietro in un C-space relativo al centro del corpo del robot. Quando si raggiunge il punto di massima estensione all'indietro, la zampa è spostata e mossa rapidamente in avanti, inversamente alla precedente traiettoria. Così si genera un movimento in avanti del robot. Inoltre, questa è un'idealizzazione della locomozione del robot che assume che non ci siano giochi tra link e giunti.

#### ➤ IL PIANIFICATORE DI ANDATURE

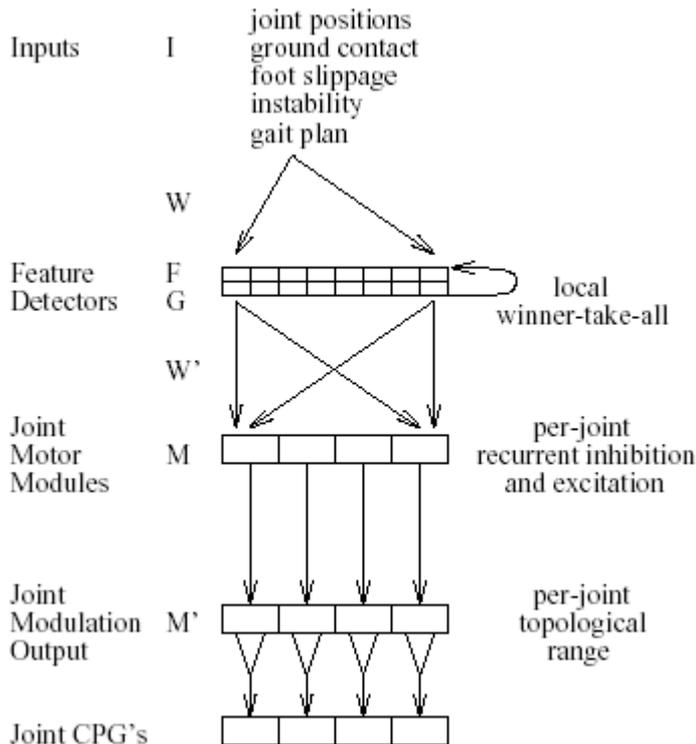
Il movimento diretto verso il goal è trattato dal gait planner. Questo include movimenti laterali e rotazioni sul posto. I controllori di questi movimenti generano segnali che modificano la posizione di obiettivo del giunto del CPG per i servomotori e le combinano con le posizioni dei giunti specificate dal CPG. Inoltre, il pianificatore dell'andatura determina la velocità dei movimenti, controllando l'inizio e il termine di ognuno di essi. L'interfacciamento tra il gait planner e il CPG avviene mediante una componente fondamentale che è un clock d'oscillazione.

Spesso, questo clock fa parte del generatore centrale di modelli e i dispositivi esterni, come il pianificatore delle andature, possono modulare il ciclo di clock con segnali appropriati. In questo caso, però, si è scelto per semplicità di implementare il clock direttamente nel gait planner.

#### ➤ L'OTTIMIZZATORE DI ANDATURE

L'ottimizzatore di andature è la componente di apprendimento del sistema. Il suo compito è di imparare in modo supplementare le uscite dei motori che ottimizzano uno o più criteri di performance. Esso combine le sue uscite con quelle degli altri due componenti per determinare le posizioni obiettivo dei servomotori dei

giunti. Questo elemento utilizza uno schema di rinforzo dell'apprendimento per acquisire i programmi del motore. Il sistema sensoriale fornisce un appropriato feedback per questo scopo, ma non è sufficiente per determinare un errore con precisione nello spazio dei giunti.

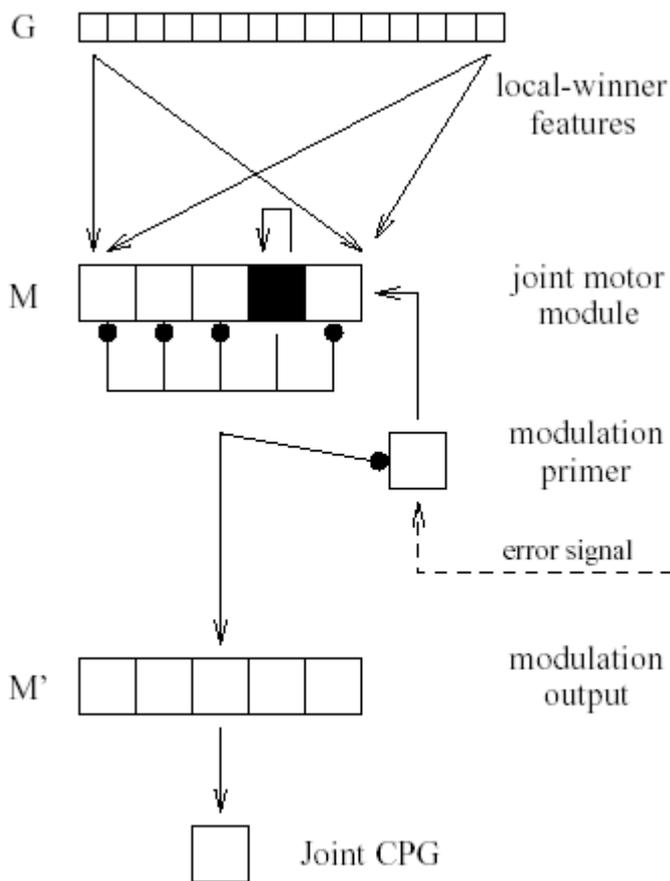


*Rete di ottimizzazione delle andature*

### ➤ ALGORITMO DI APPRENDIMENTO

L'algoritmo di apprendimento dell'ottimizzatore di andature integra le funzionalità attribuite al cervello. È basato sull'RL precedentemente illustrato e include una strategia di output del motore ispirata al modello computazionale delle rane nella selezione delle prede. Esistono delle trasformazioni chiave degli input sensoriali per l'ingresso della rete. Questo modello utilizza eccitazioni e inibizioni ricorrenti per implementare un meccanismo competitivo delle unità neurali. I dettagli di questa struttura sono mostrati in figura alla pagina seguente. Le unità dei motori M rappresentano i differenti livelli di modulazione delle posizioni obiettivo dei giunti. Ognuna seleziona un particolare livello di raffinamento per un determinato giunto. Ci sono tre fasi del calcolo per ogni unità:

1. ogni unità riceve input di eccitazione da sé stessa;
2. ogni unità riceve lateralmente inibizione da tutte le altre unità di motore per lo stesso giunto;
3. ogni unità deve oltrepassare una soglia per accendersi.



La seguente espressione calcola le attività al livello dei motori:

$$\tau \frac{d}{dt} m_{kl} = -m_{kl} + \sum_i (W'_{jkl} * G_j) + h_1 m_{kl} - h_2 \sum_{n \neq k} M_{nl} + P_l - h_3 + Noise'_{kl}$$

$$M_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{if } m_{kl} \geq 1 \\ m_{kl} & \text{if } 0 < m_{kl} < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

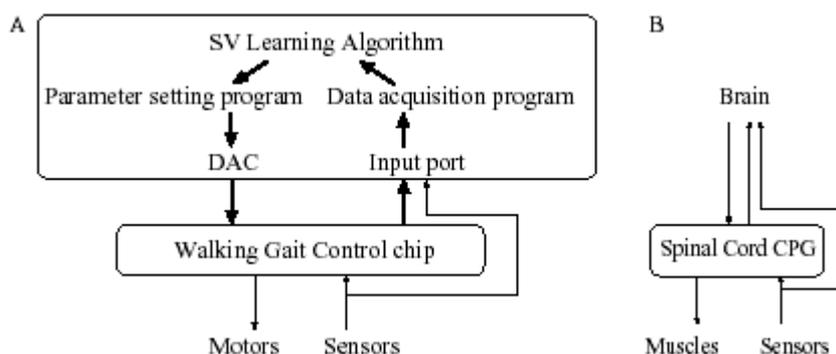
# • CONTROLLO NEUROMORFICO DELLE ANDATURE PER UN ROBOT QUADRUPEDE

## ➤ INTRODUZIONE

Si presenta ora un controllore per l'andatura di locomozione di un robot quadrupede basata su un chip VLSI neuromorfico che coordina il movimento delle zampe di un robot in modo simile a quanto accade per il CPG esaminato nel capitolo precedente, ispirato alla fisiologia di alcuni animali. Questo controllore gestisce il movimento del robot mediante delle tensioni variabili in funzione del tempo ai capi dei suoi elementi base che sono degli oscillatori disposti in coppia in una rete. Le uscite di questi oscillatori dipendono da una serie di parametri che si presentano all'ingresso del controllore. Tali uscite, in relazione con gli ingressi, possono essere calcolate analiticamente per un sistema ideale. In ogni modo, questa idealizzazione è utile soltanto in parte, poiché esiste un errore abbastanza evidente dovuto agli offset dei transistor. Viene utilizzato un supporto per l'apprendimento detto Support Vector (SV) secondo un algoritmo introdotto recentemente. Tale algoritmo richiede, ai fini dell'apprendimento, che la macchina conosca solo gli obiettivi di movimento, poi riesce ad imparare, per mezzo di esempi, il modo di settare i parametri di ingresso per raggiungere il comportamento desiderato.

I quadrupedi utilizzano diverse andature per la loro locomozione, ottenendo un minore consumo di energia alle alte velocità. Allo stesso modo, per un robot a quattro zampe è possibile affinare la sua andatura non solo a livello di velocità, ma anche rendendolo adatto a camminare su qualsiasi tipo di terreno. Il gran numero di gradi di libertà presenti in un animale, può essere simulato da un robot grazie ad un adatto sistema di controllo che cerchi di riprodurre ciò che effettivamente accade in un sistema neurale di un quadrupede.

Il robot che si descrive utilizza il seguente schema di controllo.

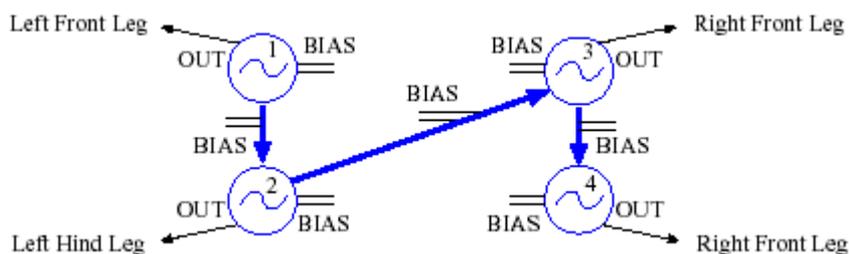


## ➤ IL ROBOT

Il robot utilizzato per testare il sistema neurale di controllo risulta essere molto semplice. Esso consiste di un corpo cui sono legate quattro zampe, ognuna di esse con un grado di libertà ed un potenziometro collegato ad ogni motore che serve da sensore interno per fornire informazioni sull'angolazione del giunto, il controllore di andature e il PC su cui gli algoritmi sono eseguiti per eseguire diversi compiti:

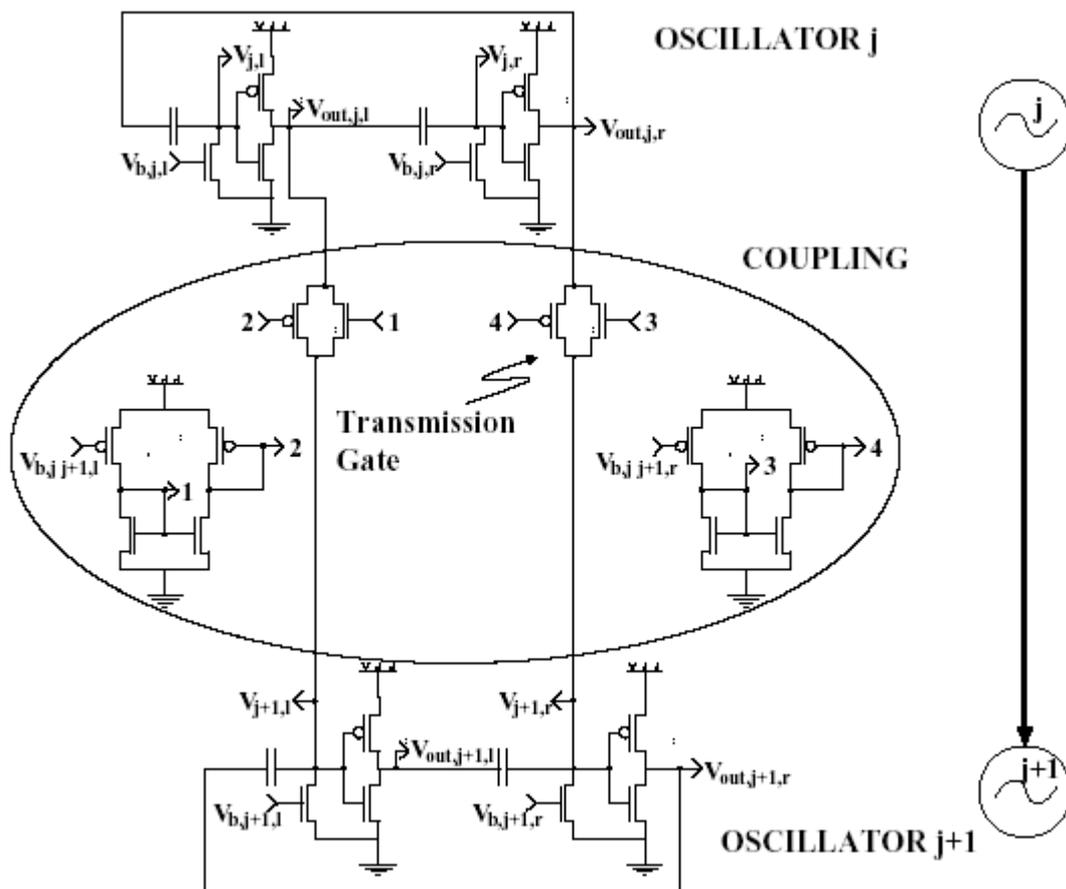
1. acquisizione di dati dal chip e dal sistema sensoriale;
2. settaggio dei parametri di input del chip di controllo;
3. implementazione dell'algoritmo di apprendimento.

L'architettura del sistema di controllo è ispirata a quella utilizzata degli organismi viventi vertebrati. Come in biologia, l'esistenza di un chip di controllo dell'andatura semplifica in modo considerevole il compito. Il calcolatore ha bisogno soltanto di un set di parametri di input al chip del GC, lasciando che il chip coordini il modello dei movimenti del motore necessari per generare la locomozione del robot. Il circuito base del controllore ha origine da un'analisi di quello introdotto da Tilden. Il chip contiene, infatti, cinque oscillatori interconnessi in diversi modi. Esso può essere usato in tre ragionevoli configurazioni, ma una soltanto è usata nella sperimentazione descritta. Si tratta di una catena di quattro oscillatori.



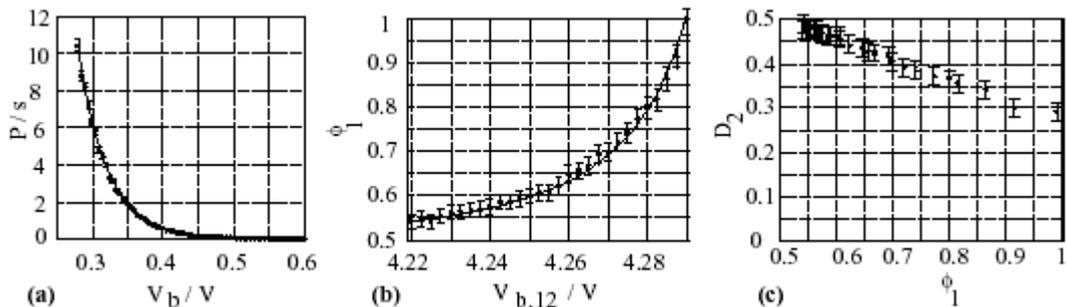
*Catena di quattro oscillatori usata per la sperimentazione*

Ognuno dei quattro componenti consiste di due sottocircuiti uguali. I due sottocircuiti sono collegati da una capacità (come si mostra nella figura alla pagina seguente). Le due parti del circuito non sono altro che degli inverter, secondo ciò che è stato descritto da Tilden.



➤ L'APPRENDIMENTO

In teoria, tutti i cicli di lavoro dovrebbero essere divisi a metà per ognuno dei semicircuiti. Nel sistema reale, il ciclo di funzionamento cambia con la fase forzata dovuta allo sfasamento dei transistor.



Volendo avere, quindi un ciclo di funzionamento equamente distribuito sui due semicircuiti, la tensione  $V_{b,j+1,l}$  deve essere diversa dalla tensione  $V_{b,j+1,r}$  (vedi figura dello schema circuitale riportata nella pagina precedente). I parametri che

portano ad un ciclo di funzionamento ottimale possono essere imparati. Innanzitutto viene assegnato al controllore un set di parametri che sono stati precedentemente stimati analiticamente. Questo set di parametri viene scansato punto per punto e ad ogni scansione si possono rilevare le caratteristiche delle uscite del controllore dall'andatura. Se il risultato ottenuto è particolarmente vicino a ciò che ci si aspettava, il set viene considerato definitivo. In caso contrario si procede con altre scansioni.

## • CONCLUSIONI

Il progetto da realizzare prevede lo sviluppo di un controllore per un robot dotato di quattro zampe per la locomozione. Il robot ha un corpo principale di forma rettangolare, ai quattro angoli del quale sono connesse le zampe. Esse sono guidate da quattro motori e ognuna ha tre giunti. Il primo giunto, collegato all'anca del robot, può ruotare verticalmente e orizzontalmente. Il secondo ed il terzo giunto possono ruotare solo verticalmente. Ne risulta, quindi, che per individuare la posizione dell'estremità libera della zampa si ha bisogno di quattro parametri per ognuna di esse, per un totale di sedici angoli. Se si assume per ipotesi di far operare il robot in un ambiente sgombro da ostacoli e con un terreno piano, si può evitare di modellizzare il mondo in modo complesso e il robot potrà muoversi secondo andature periodiche anche molto veloci. Se, invece, il mondo in cui il robot si muove non ha un terreno piano, esso non potrà assumere andature periodiche e avrà maggiore bisogno di poter reagire di fronte ad una grande varietà di situazioni che possono presentarsi. Si avverte, quindi, la necessità di avere una macchina autonoma in grado, in una qualche misura, di effettuare un reasoning su ciò che del mondo conosce, in relazione ad informazioni sulla condizione attuale fornitegli, per esempio, da un sistema sensoriale provvisto, almeno, di sensori della percezione e del tatto. Se, per ipotesi, il robot si muovesse in una stanza, quindi in ambiente indoor, si potrebbe decidere di rappresentare quanto più possibile del mondo, in modo da fornire un buon numero di informazioni al robot che avrà poi la possibilità di ragionarci su secondo un algoritmo SPA, sense-plan-act. In questo caso, il robot potrebbe relazionare ciò che conosce con le informazioni provenienti dai sensori, quindi potrebbe pianificare una reazione alle varie situazioni e agire di conseguenza. Un buon risultato si otterrebbe se si riuscisse a far in modo che il robot non solo pianifichi e gestisca le situazioni straordinarie, come la presenza di ostacoli, in modo autonomo, ma riuscisse anche ad imparare dalle sue esperienze.

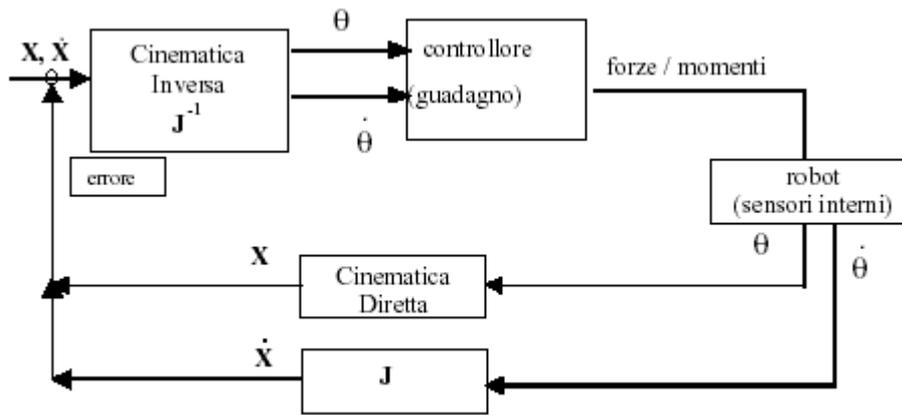
All'opposto, si ha la scelta di non rappresentare il mondo e controllare il robot in tutti i suoi spostamenti. In questo caso si avrebbe un controllo assoluto del robot da parte del controllore che dovrebbe essere fornito per ogni movimento di tutte le variabili di giunto necessarie per definire in modo non ambiguo il goal da raggiungere.

Un'altra soluzione abbastanza interessante è quella di rappresentare solo il mondo corrente. In questo modo, la reazione del robot alle varie situazioni dipenderebbe solo dalle informazioni attuali ricevute dai sensori, quindi, dallo stato sensoriale presente.

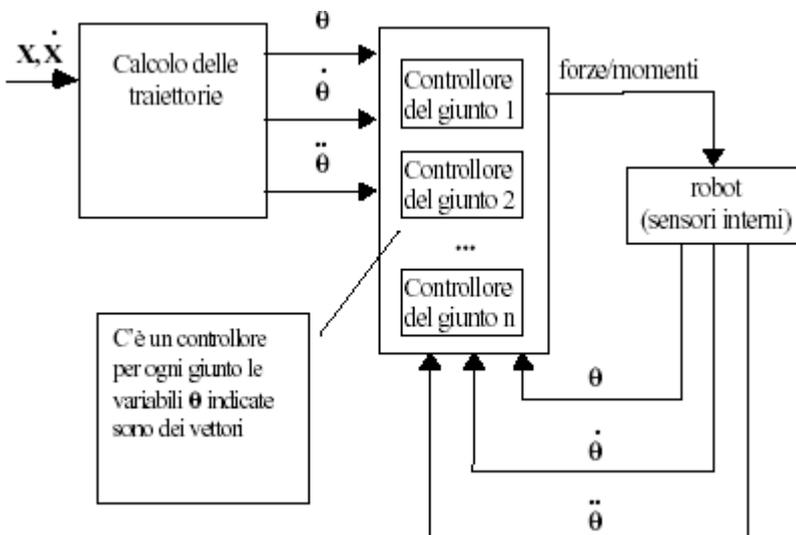
L'idea più semplice per un controllore del robot descritto, può essere data da un controllore cartesiano. Lo schema di un controllore di questo tipo è rappresentato alla pagina seguente. Per l'utilizzo di questo controllore, bisogna calcolare la cinematica diretta e inversa del robot per ogni suo spostamento. Ne segue la necessità di calcolare lo Jacobiano  $J$  e il suo inverso  $J^{-1}$ . È noto che il calcolo dello  $J$  risulta molto complesso e pesante per un calcolatore, quindi l'utilizzo di questo tipo di controllore è messo in grave crisi.

Il controllore cartesiano prevede il calcolo della cinematica inversa a partire dalle coordinate cartesiane del punto che si vuole raggiungere. Le variabili di giunto che si ottengono vengono passate al controllore che aziona la meccanica e fa compiere il

movimento alle zampe del robot. Grazie ai sensori interni, se essi sono presenti nella struttura del robot, è possibile calcolare la cinematica diretta del robot con i valori delle variabili di giunto a disposizione dal passaggio precedente. Una volta effettuato questo calcolo, è possibile applicare una retroazione che sottrae ai valori cartesiani desiderati quelli realmente raggiunti, cercando di minimizzare lo scarto.



Essendo, come già detto, il controllore cartesiano molto complesso da utilizzare, si potrebbe ricorrere ad un controllore nello spazio dei giunti. Lo schema di questo tipo di controllore è rappresentato in figura.



Occorre calcolare le traiettorie da seguire a partire dai valori delle coordinate cartesiane che si vogliono raggiungere. I valori delle variabili di giunto vengono, quindi, passate al controllore. La particolarità è che in questo caso esiste un controllore per ogni giunto. I controllori possono azionare la meccanica e compiere il movimento. Ancora grazie ai sensori interni, si può applicare una retroazione. Nel controllore al livello dei giunti, il passaggio da coordinate cartesiane a variabili di giunto avviene esternamente al ciclo di controllo.

Nel caso del robot da progettare, si può considerare ogni zampa indipendente dalle altre e trattarla come un manipolatore. In questo modo risulta possibile progettare un controllore per ognuna delle zampe. All'interno di esse, si può poi operare una ulteriore divisione, progettando un controllore al livello dei giunti in modo da avere un controllore per ogni giunto. Il controllore deve fare sì che i giunti si muovano tutti assieme per avere un maggiore coordinamento dei movimenti delle zampe. La retroazione potrebbe non essere necessaria o addirittura inapplicabile. Infatti, i movimenti che il robot deve compiere per raggiungere un goal sono, tipicamente, più di uno, di conseguenza non avrebbe molto senso verificare la posizione ad ogni passo. Per contro, il controllore di questo robot deve essere molto preciso, proprio per evitare eventuali errori che non sarebbero rilevabili.

Date delle coordinate cartesiane da raggiungere, quindi, bisogna calcolare la traiettoria da seguire in modo ragionevole. Essa va divisa in una serie di passi, rappresentati da punti consecutivi, che il robot deve fare. Ad ogni passo, quindi, il controllore di ognuno dei giunti delle quattro zampe deve fornire la variabile a cui esso deve portarsi grazie all'azionamento dei quattro motori che guidano le zampe.