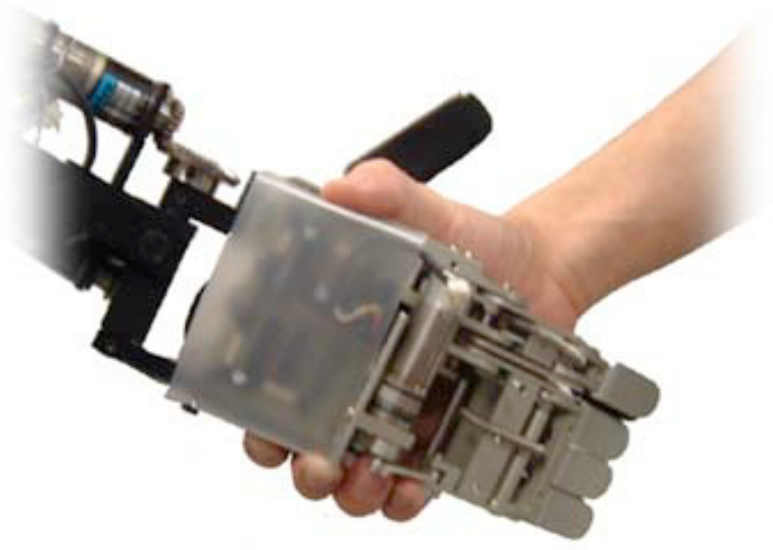
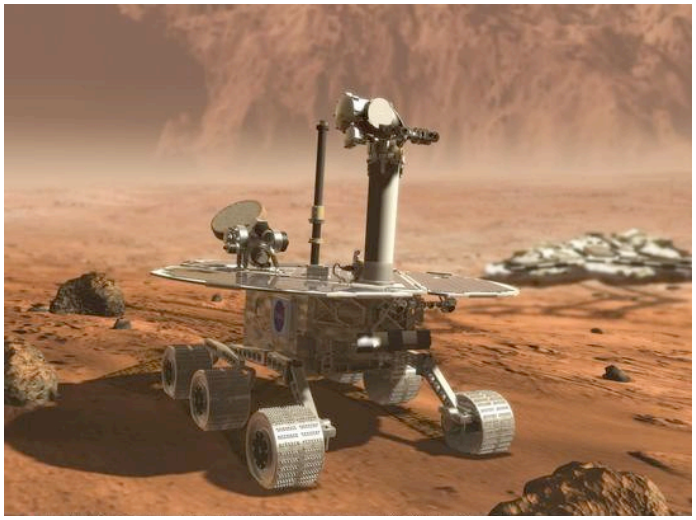
ROBOT MOBILI



ROBOT A RUOTE

- Definizioni
- Classificazione delle ruote
  - ruota fissa
  - ruota orientabile centrata
  - ruota orientabile eccentrica
  - ruota composta
- Classificazione dei robot a ruote
  - gradi di mobilità
  - gradi di sterzabilità
- Cinematica
- Controllo del movimento
- Odometria



Definizione di WMR

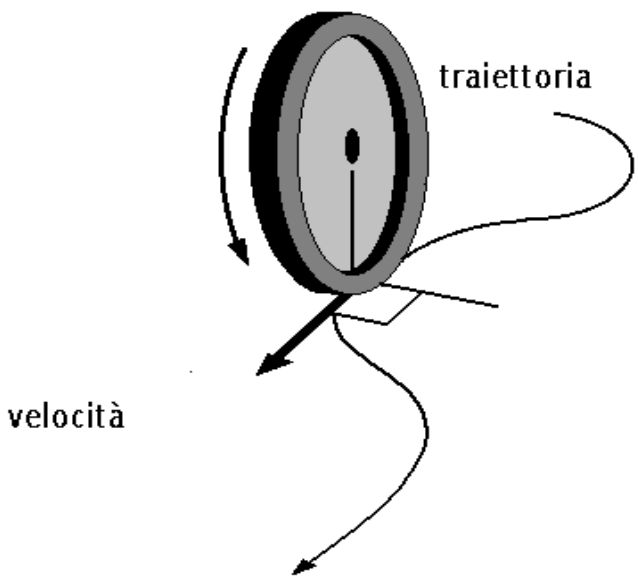
Wheeled Mobile Robot (WMR)

A robot capable of locomotion on a surface **solely through the actuation of wheel assemblies** mounted on the robot and in contact with the surface. A wheel assembly is a device which provides or allows motion between its mount and surface on which it is intended to have **a single point of rolling contact.**

(Muir and Newman, 1986)

- AGV – Automated Guided Vehicle
- ALV – Autonomous Land Vehicle

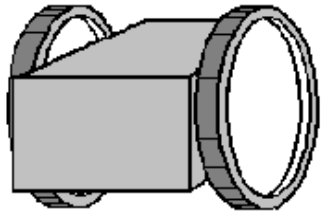
Assunzioni di base



- **Puro rotolamento**

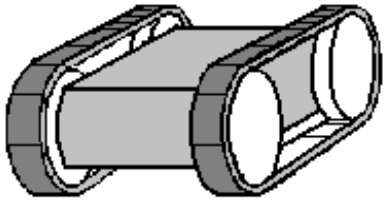
- 1. Il robot é costituito da meccanismi rigidi.
- 2. Ogni ruota contiene al massimo un link per lo sterzo.
- 3. Tutti gli assi di sterzo sono perpendicolari al suolo.
- 4. Non c'é scivolamento nella direzione ortogonale al rotolamento (non-slipping).
- 5. Non c'é traslazione fra la ruota e il suolo (puro rotolamento)

esempi



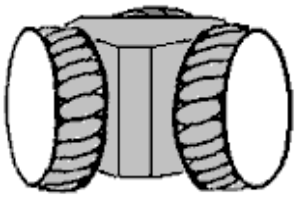
- A due ruote

- Facile da modellizzare
- Rischio di scivolamento
- Sensibile a irregolarità del terreno



- A cingoli

- Aderenza a terreni difficili
- Pendii
- Imprecisione nel modellizzare le rotazioni

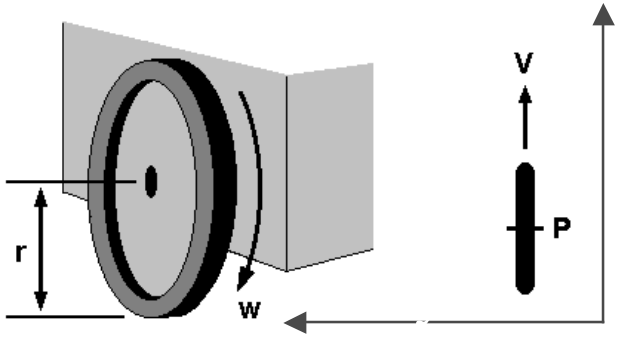


- Omnidirezionale

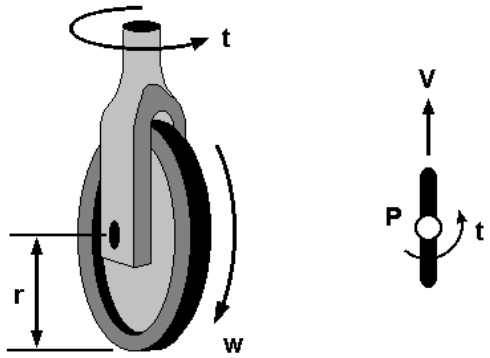
- Si muove liberamente
- Struttura complessa

Ruota fissa

- Restrizioni sulla mobilità
- **P** non può muoversi in direzioni perpendicolari al piano della ruota

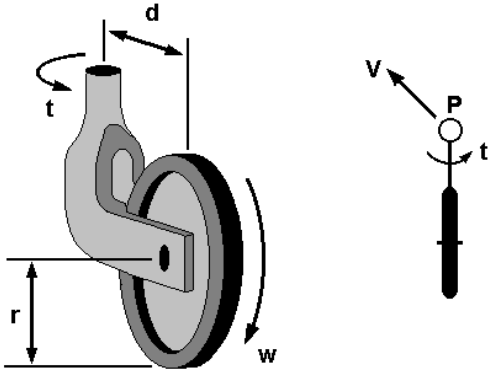


Ruota orientabile centrata



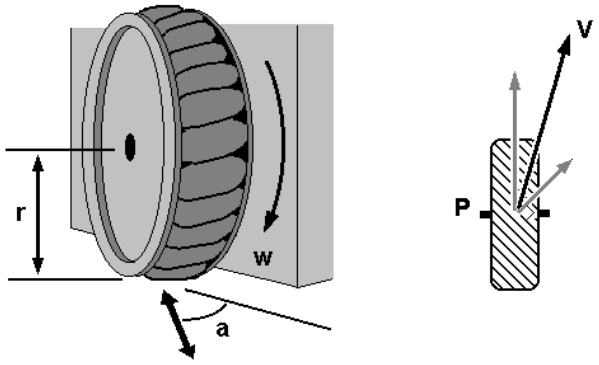
Ruota orientabile eccentrica (caster wheel)

omnidirezionale



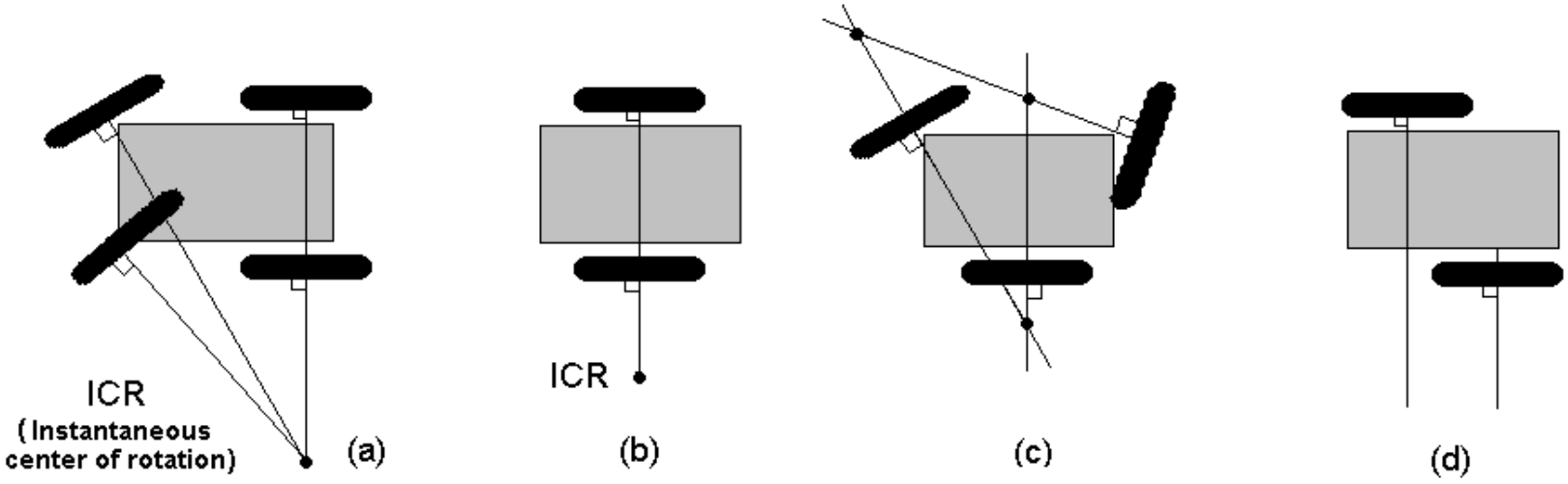
Ruota composta

Su ostacoli



CIR

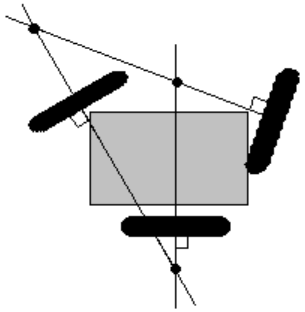
Instantaneous center of rotation (ICR), o Centro di Istantanea Rotazione (CIR) = punto di intersezione di tutti gli assi delle ruote



unico infiniti non esiste

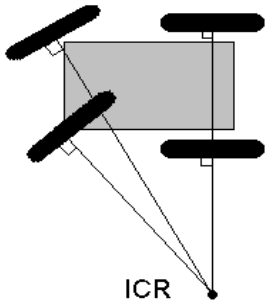
gradi di mobilità

Gradi di libertà nel movimento del robot



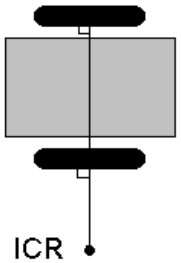
Non puo' muoversi (No CIR)

- Gradi mobilita' : 0



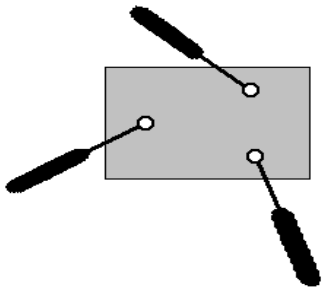
Arco fisso di movimento (un CIR)

- Gradi mobilita' 1



Arco variabile di movimento (linea dei CIR)

- Gradi mobilita' 2



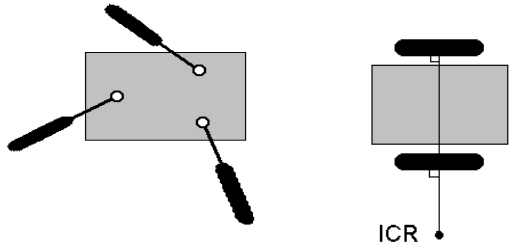
Movimento libero (CIR in ogni posizione)

- Gradi mobilita' 3

gradi di sterzabilita’

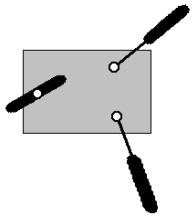
- **Gradi di sterzabilità**

  Il numero di ruote centrate orientabili che si muovono indipendentemente per sterzare il robot

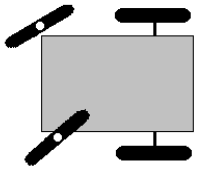


Non ci sono ruote sterzabili

- Gradi di sterzabilità: 0

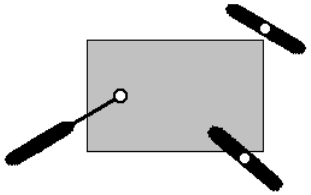


Una ruota centrata orientabile



Due ruote dipendenti centrate orientabili

- Gradi di sterzabilita’: 1



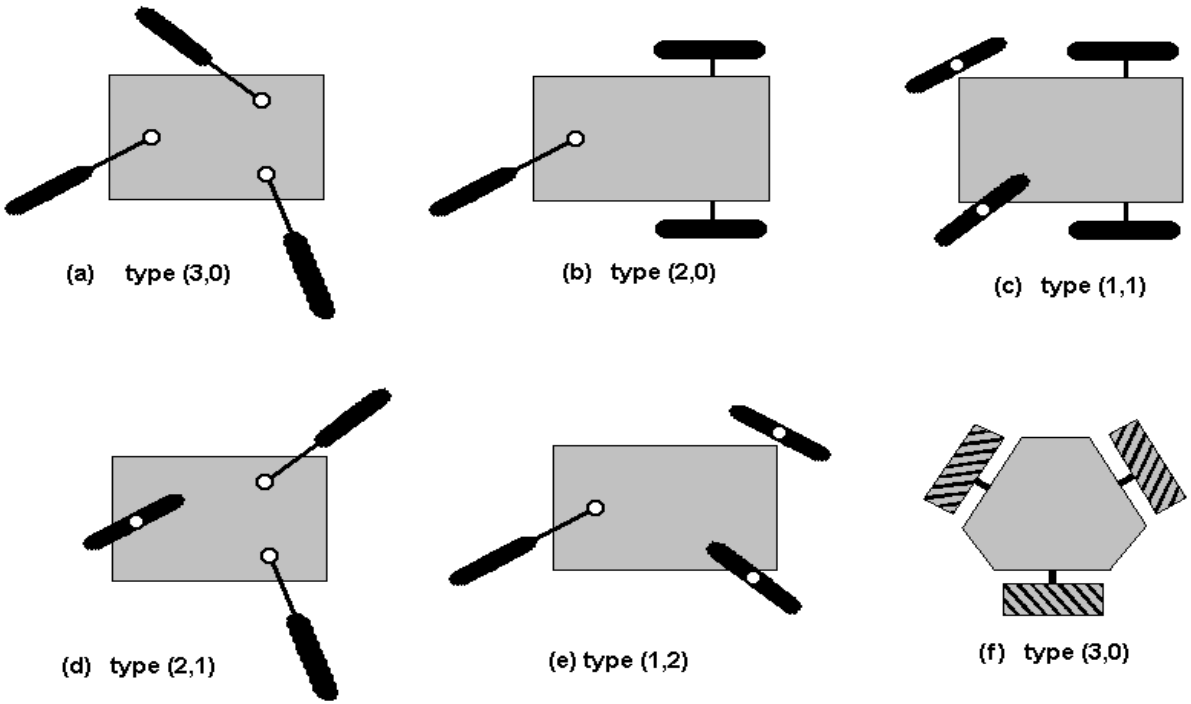
Due ruote indipendenti centrate orientabili

- Gradi di sterzabilita’: 2

classificazione dei WMR

gradi di mobilita'	3	2	2	1	1
gradi sterzabilita'	0	0	1	1	2

- Combinazioni realizzabili di coppie di gradi di mobilità e di sterzabilita'



Cinematica diretta e inversa

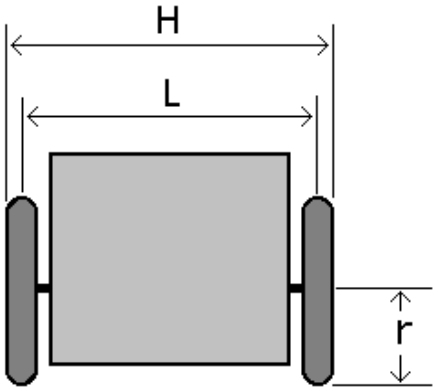
- *CINEMATICA DIRETTA = dati i parametri di controllo (ad esempio velocità delle due ruote) ed il tempo, determinare la pose cartesiana x, y, θ raggiunta dal robot*
- *CINEMATICA INVERSA = data la pose desiderata x, y, θ, trovare i parametri di controllo per portare il robot in un certo tempo alla pose*

Differential drive - 1

- Postura (pose)

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix}$$

- (x,y) : posizione
- θ : orientamento



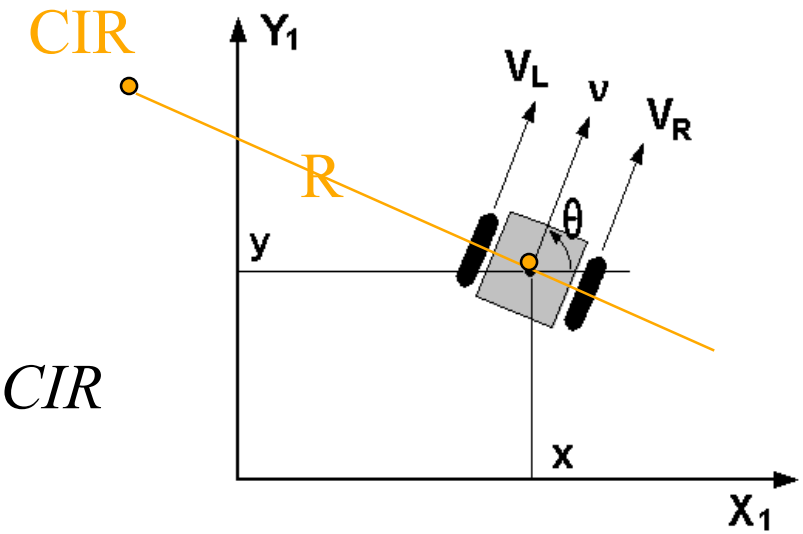
tipo (2,0)

- Input di controllo (robot come corpo che si muove sul piano)

[redacted]

Variabili indipendenti controllate = VL e VR

differential drive - 2



Costruzione:

- 2 ruote su un asse comune,
- due motori.
- terza ruota passiva.

le due ruote si muovono attorno al CIR con velocità angolare uguale ω

R raggio di curvatura istantanea

Quindi ω(R+L/2) = VR, ω(R-L/2) = VR

CIR = (x -Rsinθ, y + Rcosθ)

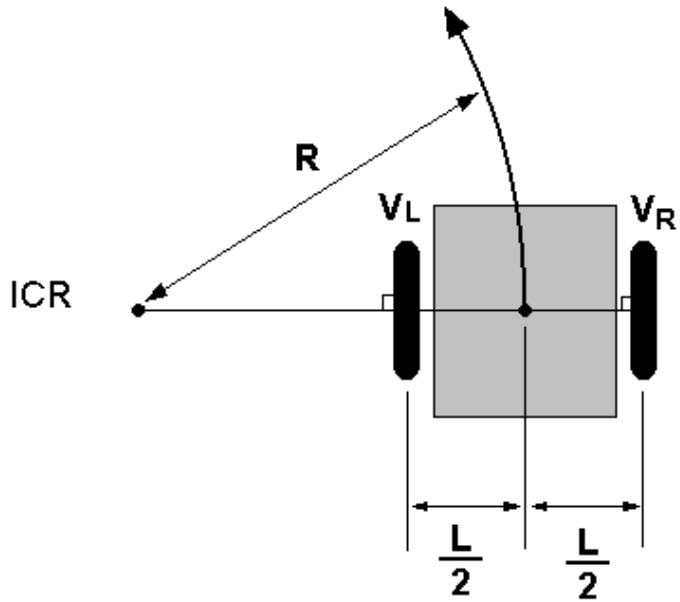
Il raggio di curvatura ruota sinistra è R-L/2, della destra è R+L/2

ω(t) = VR(t)/(R+L/2) e ω(t) = VL(t)/(R-L/2), e v = ω(t)R

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{L} \qquad v = \frac{V_R + V_L}{2}$$

- Relazione tra input di controllo e variabili di controllo V_L, V_R

differential drive - 3
CIR e controllo del moto



$$(V_R - V_L)/\ L = V_R\ /(R + \frac{L}{2})$$

$$R = \frac{L}{2}\ \frac{V_R + V_L}{V_R - V_L}$$

R : raggio di rotazione istantanea, si calcola uguagliando diverse espressioni di $\omega(t)$

CASI PARTICOLARI:

- Movimento diritto →

  R = infinito VR = VL

- Rotazione su se stesso

  R = 0 → VR = -VL

la ruota destra e sinistra seguono un cammino circolare con velocità angolare ω

$$\omega(R + L/2) = v_R$$
$$\omega(R - L/2) = v_L$$

differential drive – 4

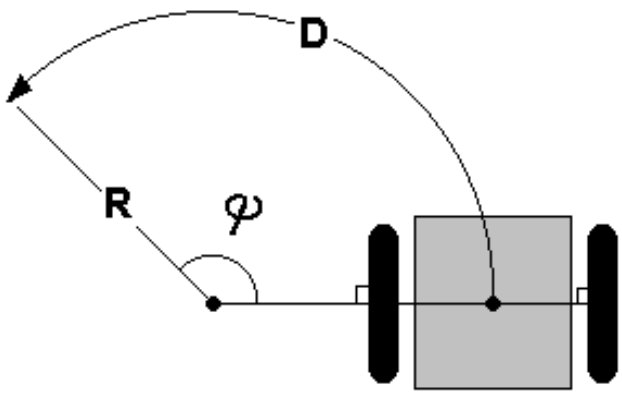
- CINEMATICA DIRETTA

Se il robot ha pose $(x, y, \theta)^T$ al tempo t

$CIR = (x,y) + R(\cos(\theta+\pi/2), \sin(\theta+\pi/2) = (x-R\sin\theta, y+R\cos\theta)$

- a $t+dt$: traslare CIR all'origine, ruotare attorno a CIR a distanza R con velocità angolare ω, traslare indietro

$(x',y',\theta')^T = Rot(z,\omega dt)Trasl(x-CIR_x, y - CIR_y,\theta)+Trasl(CIR_x, CIR_y,\omega dt)$



$$(x' \; y' \; \theta')^T = \begin{vmatrix} C\omega dt & -S\omega dt & 0 \\ S\omega dt & C\omega dt & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x-CIRx \\ y-CIRy \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} CIRx \\ CIRy \\ \omega dt \end{vmatrix}$$

Equazioni cinematica DIRETTA

- Dato CIR = $[x - R \sin(\theta), y + R \cos(\theta)]$, al tempo t+dt la posizione (x', y', θ') del robot si ottiene costruendo la rotazione alla distanza R dal centro di istantanea rotazione con velocità angolare ω.
- $[x', y', \theta']^T = Rot_z(\omega \cdot t) \cdot [x - CIR_x, y - CIR_y, \theta] + [CIR_x, CIR_y, \omega \cdot t]$

- La soluzione della CD, note le velocità delle ruote, si ottiene integrando fra 0 e t

$$x(t) = \int v(t) \cos(\theta(t))\, dt$$

$$y(t) = \int v(t) \sin(\theta(t))\, dt$$

$$\theta(t) = \int \omega(t)\, dt$$

Soluzioni particolari - differential drive

- **Cinematica Diretta**: sostituendo a v la media delle due velocità abbiamo le equazioni

  $x'(t) = 1/2 \int [v_L(t) + v_R(t)] \cos(\theta(t))\, dt$

  $y'(t) = 1/2 \int [v_L(t) + v_R(t)] \sin(\theta(t))\, dt$

  $\theta'(t) = \int \omega(t) dt =$

  $\int [v_R(t) - v_L(t)]/l\, dt = t\, [v_R(t) - v_L(t)]/l$ se assumiamo VR e VL costanti

Sostituendo a θ nelle equazioni generali troviamo facilmente

$x(t) = [v_L + v_R]/ [v_R - v_L]* L/2*\sin [t(v_R- v_L)/L]$

$y(t) = [v_L + v_R]/ [v_R - v_L]* L/2*\cos [t(v_R- v_L)/L] + [v_L + v_R]/ [v_R - v_L]* L/2$

Se invece VR=VL, queste soluzioni non sono valide, R è infinito, e $\theta(t)$ è costante.

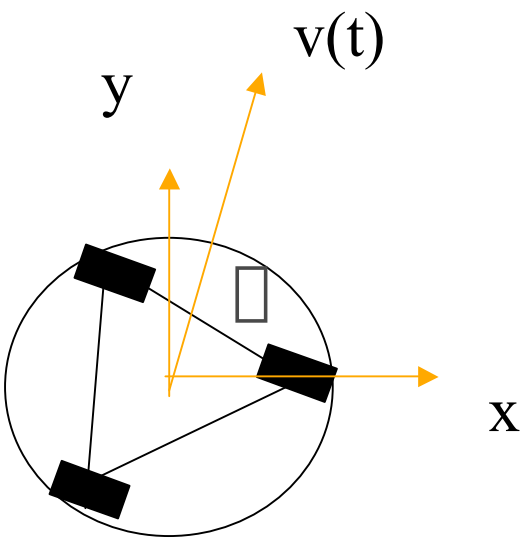
Cinematica Inversa: il problema è sottovincolato, ci sono infiniti valori a VR e VL che portano il robot a destinazione.

per trovare le velocità da attuare, le equazioni di vincolo sulla velocità del robot non possono essere integrate in un vincolo sulla posizione (vincolo anolonomo). Usiamo i casi particolari.

- Per portare il robot ad una certa pose (x, y, θ) possiamo farlo avanzare fino a (x, y), impostando vR=vL, quindi farlo ruotare sul posto fino a raggiungere l'orientamento θ.
- Per ruotare sul posto poniamo vR = -vL

Synchronous drive

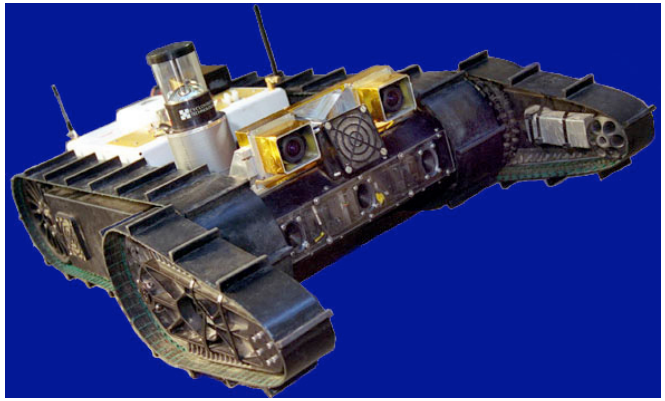
- 3 ruote attuate e sterzanti controllate insieme. Le variabili di controllo sono la direzione e la velocità delle ruote.
- E' realizzato con due motori, uno per girare tutte le ruote ed uno per sterzarle. Dal momento che tutte le ruote rimangono parallele, il robot ruota attorno al suo centro. E' quindi possibile controllare direttamente θ.



Altri veicoli

- Nell'automobile (sterzo di Ackerman) le due ruote anteriori ruotano su due bracci separati e possono ruotare di angoli diversi per puntare al CIR, che si deve trovare su una linea passante per l'asse posteriore del veicolo. Questa soluzione è la preferita per grossi veicoli, e consente qualche adattamento a terreni non piani.
- Triciclo (2 ruote passive, 1 sterzabile e attuata) comune negli AGV. Odometria come per il veicolo di Ackerman.
- Omnidirectional drive, con ruote composte o con ruote semplici ma comandate e sterzabili separatamente. Cinematica complessa.

Cingolati



- Errori pesanti di odometria
- Movimento rettilineo: i cingoli vanno alla stessa velocita' e direzione
- Rotazioni: rotazione sul posto.
- Cinematica - come differential drive sul piano.
  - v dei cingoli inside e outside (r diametro ruota trainante)
    - $v_o = r\omega_0$
    - $v_i = r\omega_i$

  Su terreni reali occorre un modello dello slittamento – parametri percentuali

Odometria

- Dead-reckoning “deduced reckoning” dal termine marinaro per trovare la locazione della nave conoscendo
  - la posizione precedente, la velocità, il tempo dt.
- Semplice: odometria, un sistema a bordo misura la strada fatta (ad esempio con encoder ottici).
- L’accuratezza dell’odometria dipende dalla cinematica (e dal terreno).

Tipologie di odometro

Montando gli encoders su diverse ruote

- 1 – sulle ruote motrici. Semplice (sta sul CIR) ma poco preciso per slittamenti.
- 2 – su una ruota libera aggiunta. Risente del carico e di errore sistematico (non è sul CIR)
- 3 – su due ruote libere aggiunte per la misura. Se non caricate occorre garantire l'aderenza al suolo.

Cause di errore odometrico

1 Sistematico

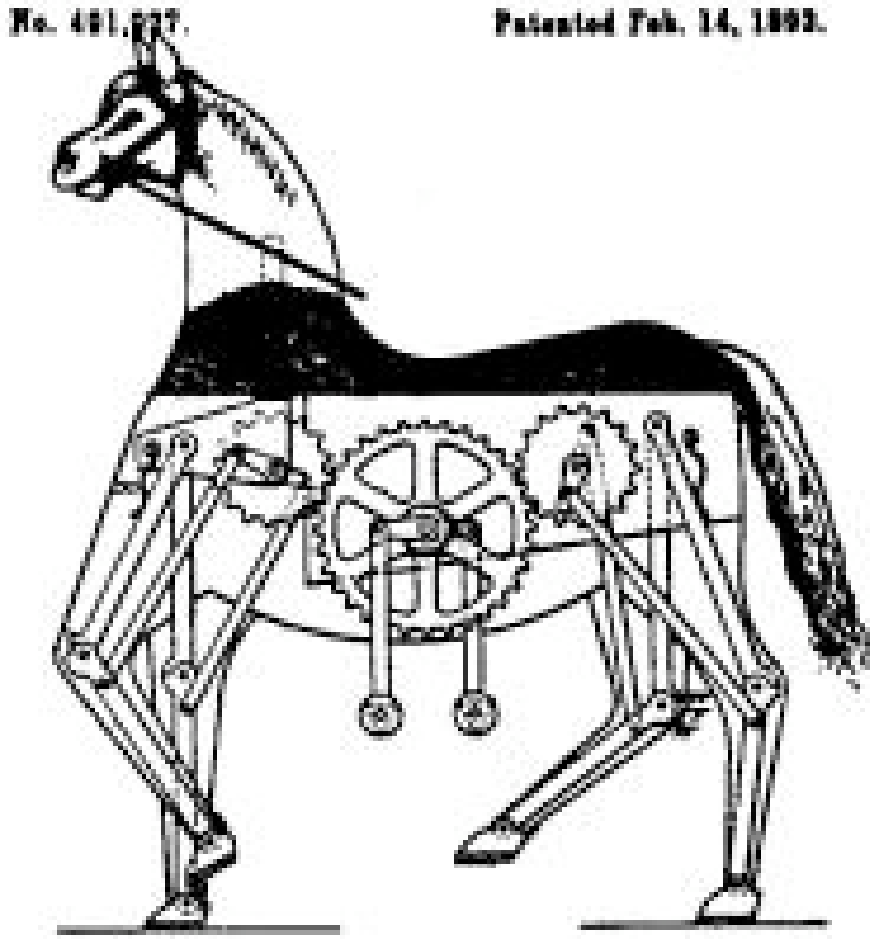
- Componente radiale della velocità
- Precisione degli encoders
- Approssimazioni dell'algoritmo di stima
- Cattiva calibrazione dei parametri

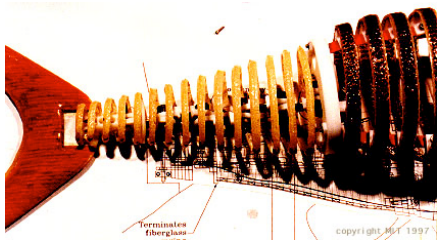
2 random error

- Slittamento
- Irregolarità del terreno
- Punto di contatto casuale della ruota

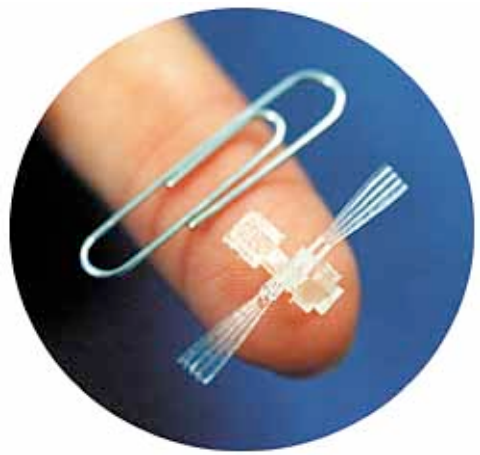
MOBILITA' CON ARTI

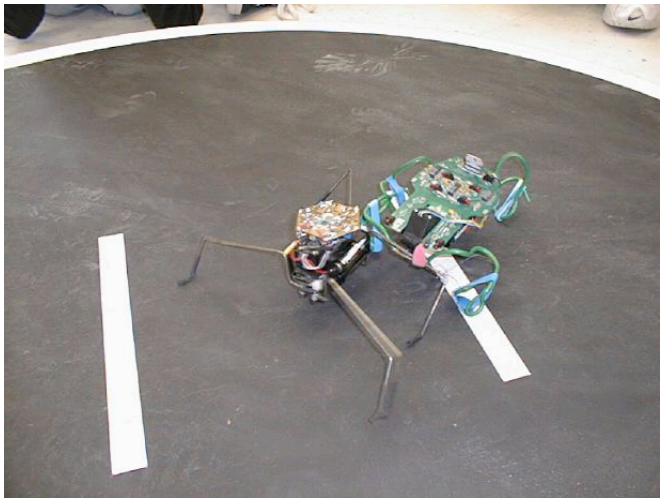
Controllo biologico
Zampe
Stabilità
Andatura





Robot ad arti





- Per muoversi sul terreno: zampe
- Per muoversi in acqua: pochi esempi di robot pesce (non fatti come missili)
- Per muoversi in aria: pochi esempi di insetti volanti con ali mobili
- Più esempi di sistemi con zampe articolate, soprattutto esapodi

Vantaggi e svantaggi zampe

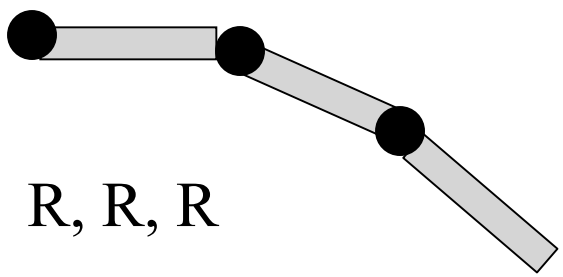
- *Su terreni naturali possono garantire il supporto al robot. Sono pero' piu' complessi e lenti.*

- **stabilità statica -** il centro di gravità del veicolo entro il convex hull del poligono di supporto, dato dalle zampe appoggiate a terra
- **stabilità dinamica -** il centro di gravità può uscire
- Problema nuovo: coordinamento delle zampe

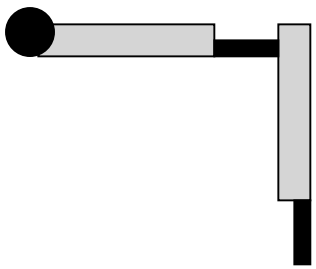
Zampe e arti

- Ogni zampa può essere modellizzata come una catena sequenziale, con matrici di coordinate omogenee.
- Spesso si usa un insieme minimo di giunti (3) e non si considerano i gradi di libertà del contatto del piede col terreno.
- Il problema per robot dinamicamente in equilibrio è lo studio del modello dinamico
- la scelta dell'andatura influenza le prestazioni del sistema.

Progettazione delle zampe



R, R, R



R, T, T

- Ogni zampa dovrebbe avere almeno 3gdl
- Per controllare il contatto con il suolo ne servono altri
- Si possono usare semplici giunti rotazionali o prismatici
- Ogni zampa puo' essere studiata come un manipolatore per raggiungere l'appoggio

Numero zampe e stabilità

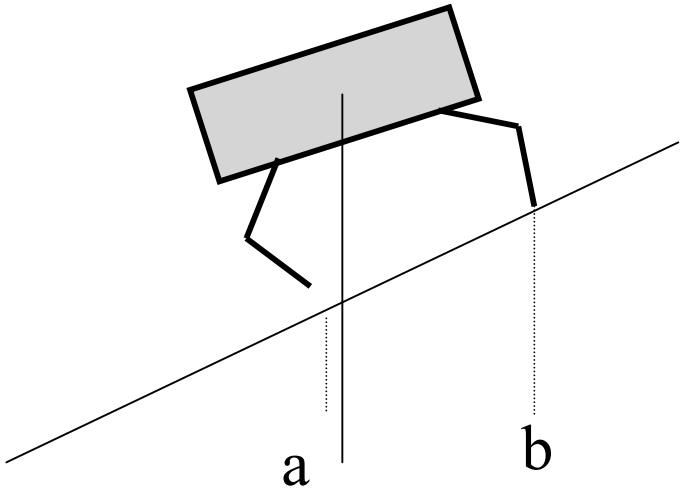
- 1 - (Raibert 1980) una sola zampa
- 2 – bipedi, circa 1990
- 4 – quadrupedi
- 6 – insetti
- 8 – ragni
- un robot staticamente stabile deve avere almeno 4 zampe, considerando che il contatto del piede sul terreno viene visto come puntiforme.

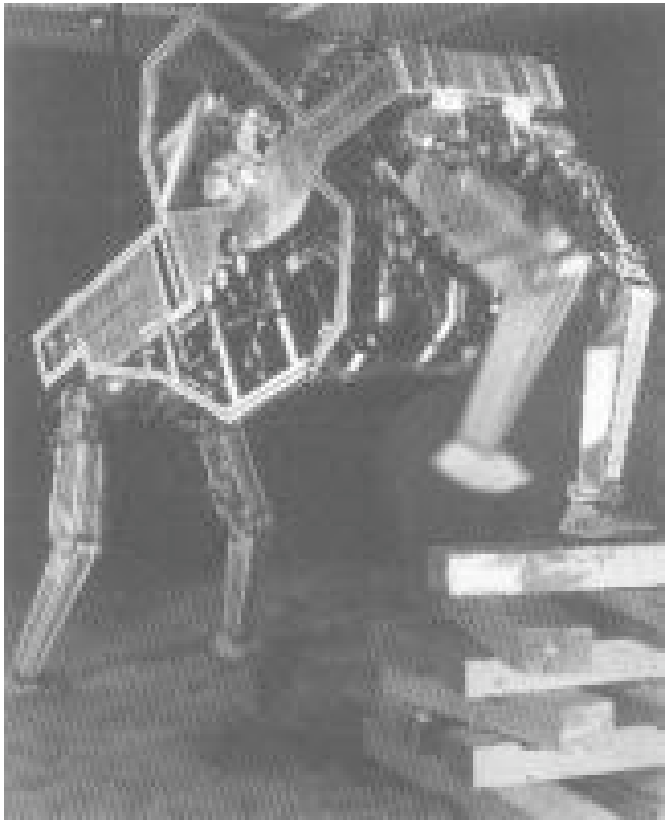
Stabilità del veicolo - 1

2D di un robot a 4 zampe.

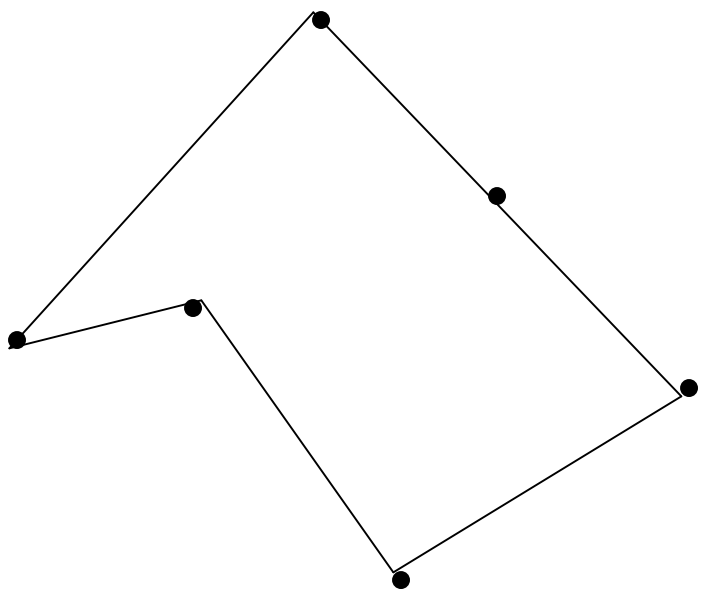
I piedi toccano il suolo in a e b, la proiezione del baricentro deve restare fra a e b.

Necessità di inclinometro





Stabilità del veicolo - 2



- Un robot a 6 zampe. E' stabile se il centro di massa è nel convex hull degli appoggi dei piedi.

GAIT (andatura)

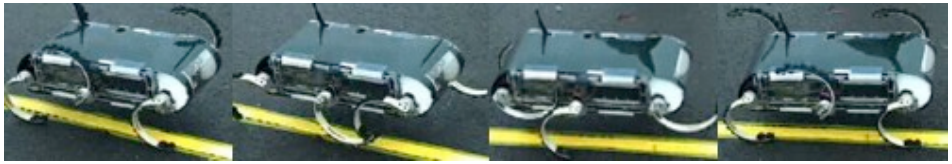
- pattern regolare di posizionamenti delle zampe durante la camminata (dallo studio delle andature degli animali (Muybridge 1877) per i quadrupedi)
- due fasi:
  - trasferimento - la zampa non tocca il terreno,
  - supporto - la zampa è appoggiata.
- Il tempo per completare un passo è tempo di ciclo, ed il duty factor è quella frazione del tempo di ciclo in cui la zampa è appoggiata.

Movimento zampe e avanzamento

- Le andature dei sistemi artificiali sono semplici e limitate.
  - scegliere il pattern di appoggio delle zampe sul terreno,
  - garantire che il corpo avanzi. Si può ottenere questo muovendo il centro di massa in modo da massimizzare la stabilità. In alternativa si può rinunciare alla stabilità statica ed inseguire solo quella dinamica.

ESAPODI

- MIT - Genghis, Attila
  - Zampe a 2 o 3 gd (12 o 18 gdl)
  - Behaviors:
    - 12 per portare la zampa avanti o indietro (angoli alpha)
    - 6 condizioni percettive: zampa alzata
- Apprendimento: Beer con NN



Gait dei quadrupedi

I sistemi biologici usano andature non periodiche sui terreni non piani, mentre sul piano ed in assenza di ostacoli usano andature periodiche.

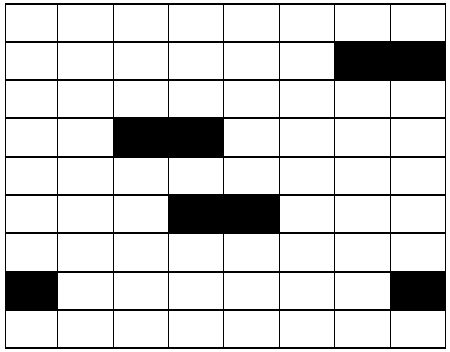
Otto per i quadrupedi sul piano.

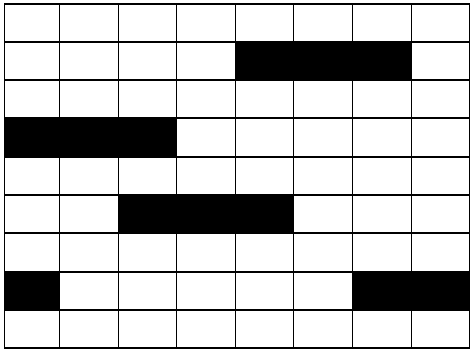
- camminata, la sola staticamente stabile, si muove una zampa alla volta;
- galoppo, andatura più veloce, le zampe anteriori e posteriori si incrociano;

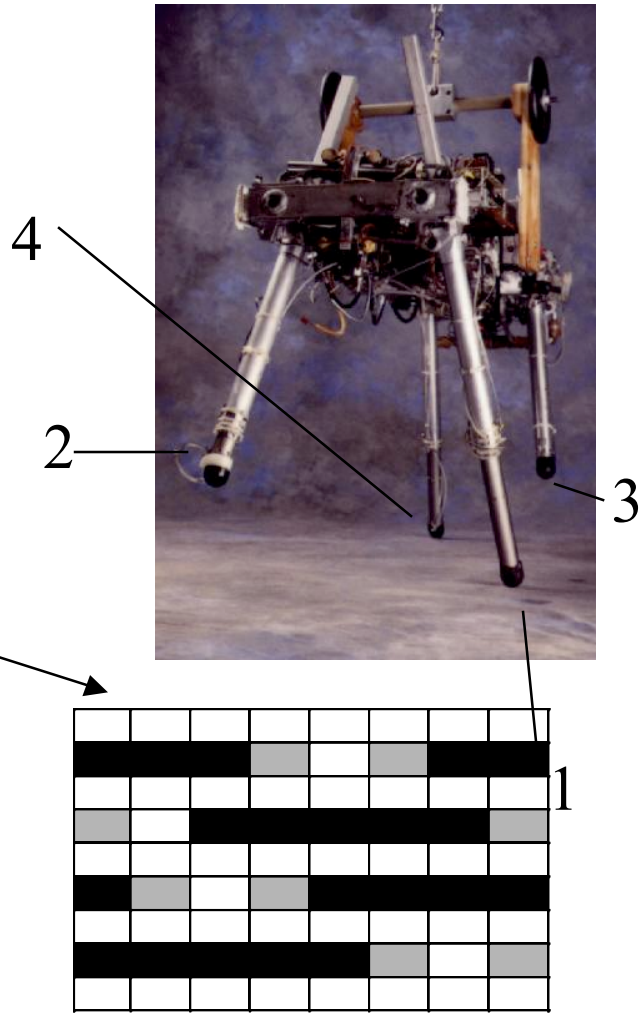
Quadrupedi

8 ANDATURE dei quadrupedi

1. Cammino - unica staticamente stabile-
2. Ambio
3. Trotto - supporto sulle zampe in diagonale
4. Pace o rack - supporto sulle zampe di un lato
5. canter
6. galoppo traverso
7. galoppo rotatorio
8. Saltello (bipede)

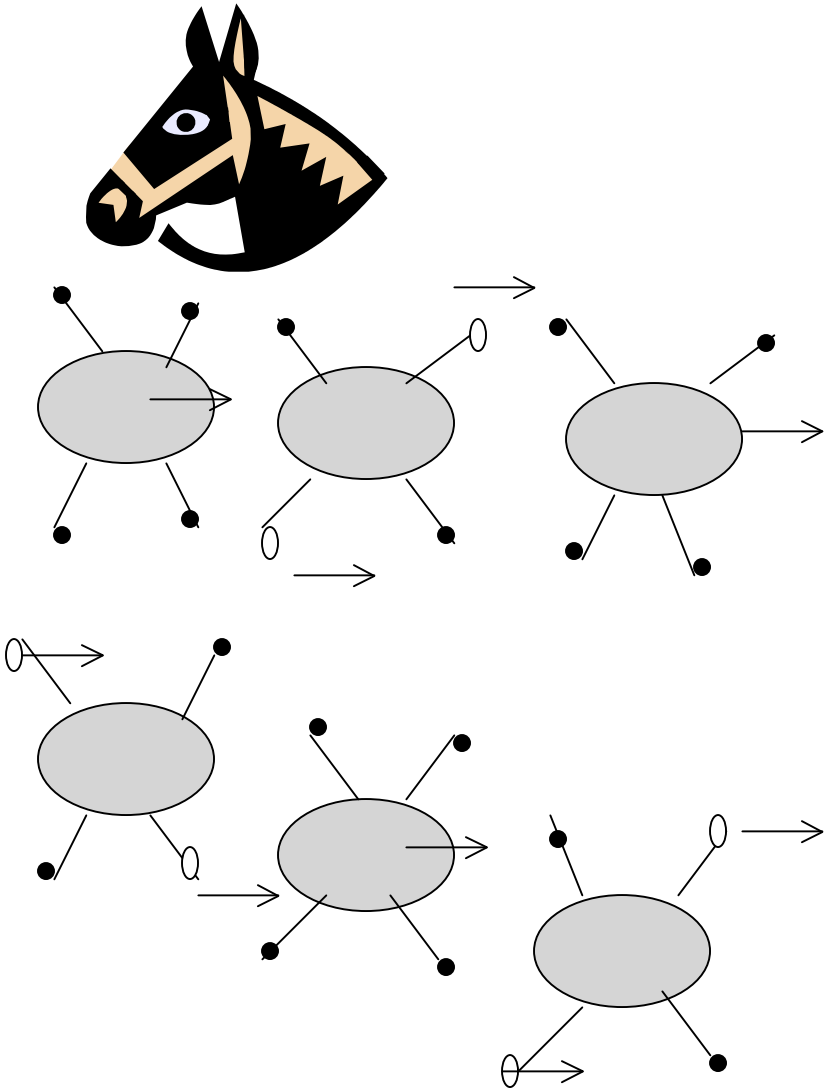






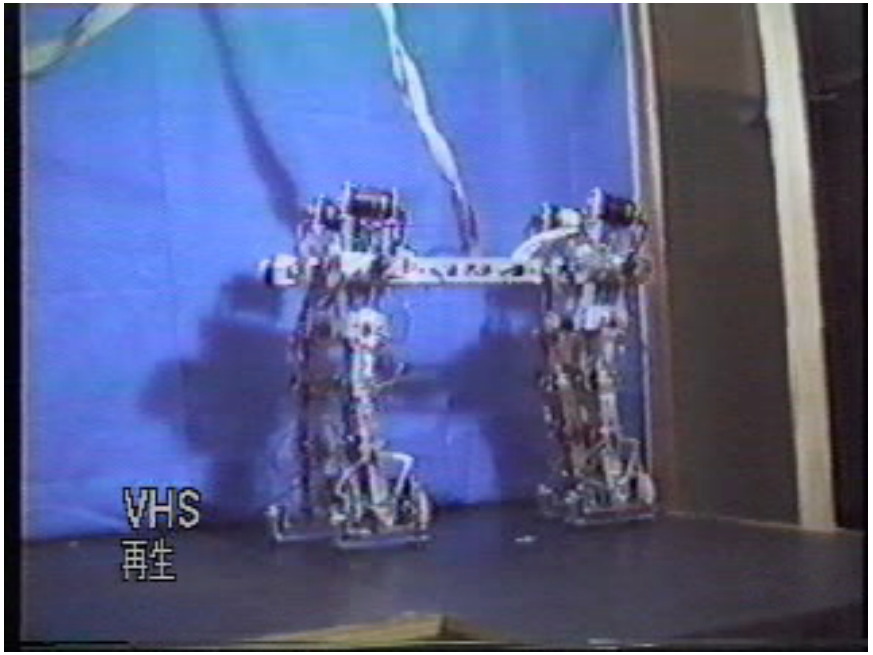
Pattern di appoggio sul terreno

Il trotto dei quadrupedi



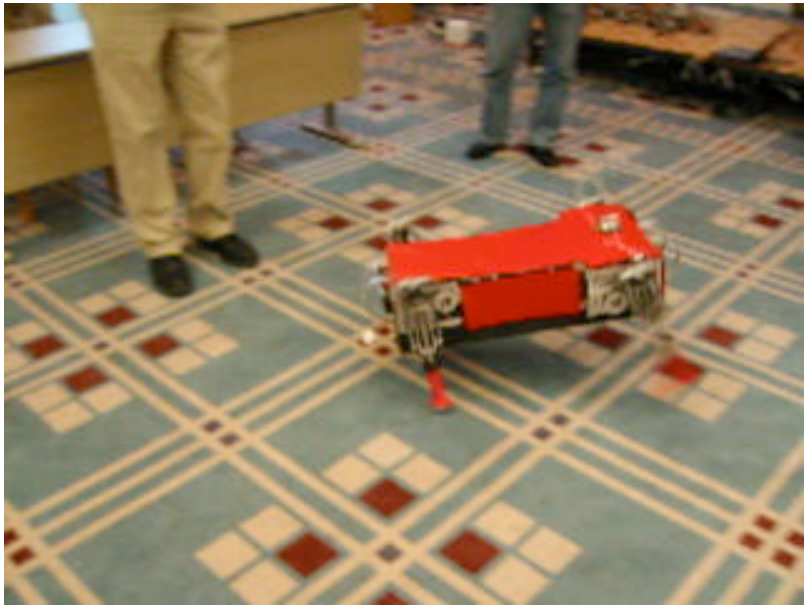
- Nel primo ciclo, il peso è supportato dalla coppia in diagonale davanti/destra e dietro/sinistra;
- nel secondo ciclo dalla coppia davanti/sinistra, dietro/destra.
- Quando i 4 piedi sono appoggiati il corpo si muove in avanti

Quadrupedi

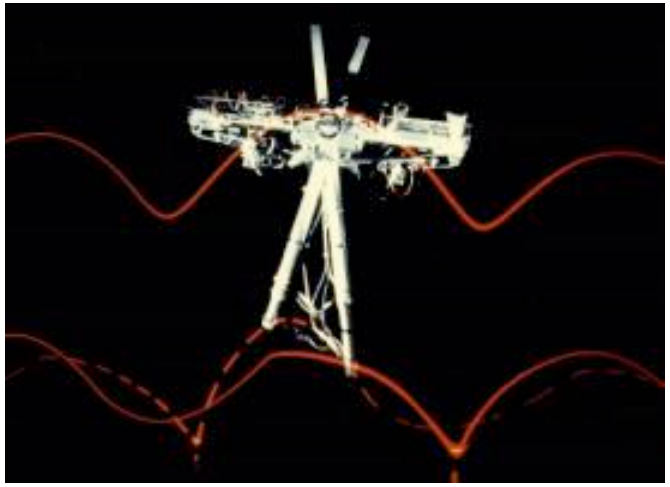


Collie - trotto e pace

Scout che galoppa

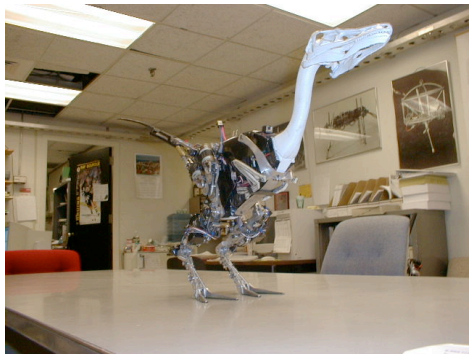


BIPEDI



- 3D di Raibert

Mit Legs Lab



Troody

modello

- Il **centro di massa** ruota sopra l'arto d'appoggio, la sua proiezione cade tra i due piedi.
- L'oscillazione del baricentro permette la trasformazione dell'energia potenziale (accumulata durante la prima parte dell'appoggio) in energia cinetica come nell'oscillazione di un pendolo.
- Si ha il **"modello del pendolo invertito"**, in cui l'energia non viene recuperata totalmente: la parte dissipata per vincere gli attriti è fornita dai muscoli

Controllo del cammino

*Il dibattito su quali siano le variabili direttamente controllate dal sistema nervoso centrale è aperto: negli esseri umani non esistono "sensori" della posizione istantanea del baricentro. Esistono sensori di lunghezza dei muscoli (**fusi neuro-muscolari**), sensori cutanei e articolari che sono in grado di fornire nel loro insieme una percezione della posizione delle estremità nello spazio.*

*Circuiti neurali (**oscillatori**) per moti ritmici.*