

Robot Mobili Autonomi

Basilio Bona
Dipartimento di Automatica e Informatica
Politecnico di Torino

basilio.bona@polito.it

Internal Report: DAUIN/BB/2006/03.01

Draft: 5 aprile 2006

1 Introduzione

In questa dispensa verranno esposte le basi della cinematica e della dinamica dei robot mobili.

I robot mobili sono, per definizione, quelli che possiedono la capacità di muoversi in ambienti terrestri, marini o aerei.

Tali robot possono essere *autonomi* o *non autonomi*; con il termine “autonomia” si indicano generalmente due proprietà:

1. l'autonomia relativa alle fonti di energia: queste possono essere collocate a bordo, e allora il robot è detto autonomo (rispetto alle fonti di energia), oppure a terra e collegate ai vari azionamenti di bordo mediante un cavo o “cordone ombelicale”, e allora il robot è detto non autonomo (rispetto alle fonti di energia);
2. l'autonomia relativa alle unità di elaborazione e calcolo (la cosiddetta “intelligenza”): queste possono essere collocate a bordo, oppure no. Nel primo caso il robot è autonomo (rispetto all'elaborazione), nel secondo no. In quest'ultimo caso i robot sono di solito guidati a distanza (teleguidati) da un operatore umano, nel qual caso l'unità di elaborazione è semplicemente quella dell'operatore, oppure sono asserviti ad un computer remoto, che trasmette e riceve segnali da/per il robot attraverso un canale radio mono- o bi-direzionale, oppure un canale all'infrarosso, di solito monodirezionale CPU \Rightarrow robot, ecc.

In questa dispensa chiameremo autonomi i robot che si muovono in assenza di cavi di collegamento diretto a fonti di energia esterne (i cosiddetti *cordoni ombelicali*) e che possiedono una qualche “intelligenza” a bordo, sotto forma di CPU, memorie, sensori e possibilità di comandare attuatori.

I robot mobili autonomi terrestri, che sono l'oggetto esclusivo di questa dispensa, si possono classificare in diverse categorie a seconda del tipo degli organi di locomozione previsti: questi sono essenzialmente ruote e gambe, anche se negli ultimi anni si va diffondendo la locomozione di tipo serpentiforme (*robotic snakes*). Per i robot aerei o marini esistono anche altre forme di attuazione della locomozione, come eliche, remi, vele, getti d'acqua o aria, ecc.

Ci limiteremo a considerare robot mobili su ruote, chiamati anche *rover*, che rappresentano la classe più numerosa di applicazioni, data la semplicità costruttiva che li caratterizza.

I robot ruotati sono pensati per rimanere stabili sui terreni sui quali si muovono. Questi terreni possono andare da superfici artificiali relativamente piane e prive

di significative pendenze, presenti nei laboratori di ricerca, negli spazi di grandi magazzini, negli aeroporti, nelle sale di esposizione ecc. (*indoor rovers*), a superfici reali, piene di ostacoli, avvallamenti, scale ecc., che sono l'ambiente naturale di quei rover che devono essere impiegati in esterno (*outdoor rovers*).

La stabilità sul terreno è garantita dalla presenza di almeno tre ruote, anche se esistono robot con solo due ruote che possono comunque essere stabili sotto opportune condizioni.

Quando il loro numero è superiore a tre, le ruote devono essere connesse al telaio principale del rover mediante sospensioni e ammortizzatori, in quanto il contatto con il suolo non è garantito, a meno che non siano appunto presenti le sospensioni. Per robot che si muovono a bassa velocità può essere sufficiente dotare le ruote di pneumatici a bassa pressione che forniscono un certo grado di adattamento al terreno e di elasticità.

Nella Sezione successiva vedremo quali sono i principali tipi di ruota utilizzati nei robot mobili.

2 Tipi di ruote

Un robot mobile su ruote consiste essenzialmente di un telaio rigido o semi-rigido sul quale vengono sistemate in modo opportuno una o più ruote, allo scopo di sospendere il telaio rispetto al suolo e consentirne la locomozione.

Ciascun tipo di ruota presenta una propria cinematica e pertanto la scelta delle ruote influisce sulla cinematica complessiva del robot mobile.

Esistono essenzialmente quattro tipi di ruota, schematizzati in Fig. 1:

- la **ruota semplice**, che può essere sterzante o fissa. È la ruota più comune e anche la più semplice da costruire e da modellare cinematicamente. Essa consta di un *asse di rotazione* intorno al quale si sviluppa il movimento di rotazione della ruota stessa, di solito parallelo al terreno e di un *asse di sterzo*, ortogonale al primo, che passa dal punto di contatto istantaneo tra ruota e suolo e dal centro della ruota.
- la **ruota basculante** (in inglese *castor wheel*). Si tratta di una ruota non molto diversa dalla precedente: l'unica differenza significativa consiste nell'asse di sterzo non intersecante l'asse di rotazione (orizzontale), ma posto ad una distanza opportuna dal centro della ruota.

entrambi questi tipi di ruota sono altamente direzionali, in quanto, in linea di principio non consentono moti di strisciamento, né longitudinale, né trasversale.

La velocità di avanzamento della ruota è istantaneamente normale all'asse di rotazione. Ciò si traduce nel fatto che non possono cambiare la loro direzione di avanzamento se non ruotando intorno all'asse di sterzo, che, come detto, passa per il punto di istantanea rotazione (cioè quello di contatto tra ruota ideale e piano, vedi Fig. 2). Tale rotazione può avvenire sia in modo passivo sia in modo attivo, quando è presente uno sterzo attuato.

Nella castor wheel l'asse di rotazione verticale non interseca l'asse orizzontale, e questo fa sì che si generi una forza sul telaio durante il cambiamento di direzione.

- la **ruota omnidirezionale**, che prende anche il nome di *swedish wheel*. Si tratta di un particolare tipo di ruota che permette un movimento sia di avanzamento longitudinale sia di traslazione laterale, che la ruota semplice non consente. Complessa da costruire e quindi costosa, presenta alcuni vantaggi, ma anche qualche svantaggio, tra cui il costo elevato e una ridotta resistenza alle spinte laterali.
- la **ruota sferica**. Si tratta di una sfera più o meno elastica, che ovviamente non possiede un asse di rotazione privilegiato. Concettualmente semplice, è però voluminosa e poco adatta per essere motorizzata, in quanto sono necessari particolari accorgimenti per generare il moto.

Sullo stesso telaio possono essere montate ruote di tipo diverso per sfruttare al meglio le caratteristiche di ciascuna, come vedremo nel seguito.

2.1 Ruota semplice non sterzante

La *ruota semplice non sterzante*, sommariamente raffigurata in Fig. 3, è considerata la ruota più comunemente utilizzata in robotica mobile.

È costituita da un telaio fisso su cui viene montata la ruota a contatto del terreno. Il telaio può essere collegato al robot mobile attraverso una sospensione elastica con un eventuale ammortizzatore, ma nell'ambito della presente trattazione, questi aspetti particolari non vengono considerati e si fa riferimento al semplice modello cinematico della ruota, illustrato in Fig. 4.

La direzione di avanzamento della ruota non sterzante è sempre ortogonale all'asse di rotazione, e coincide con la direzione della velocità istantanea \mathbf{v} , secondo quanto rappresentato in Fig. 4.

L'asse di rotazione orizzontale può essere attuato da un motore in modo diretto, oppure attraverso una scatola di accoppiamento dotata di motoriduttori; in entrambi i casi si dice che la ruota è **attuata** o **attiva**, in quanto fornisce la potenza che consente al rover di avanzare. Il motore è prevalentemente elettrico,

per le sue caratteristiche di compattezza, facilità di uso e di comando, e per le prestazioni che può fornire, purchè sia disponibile a bordo una sorgente di energia elettrica adeguata (di solito batterie ricaricabili o alimentate direttamente da fonti di energia alternativa, come l'energia solare o le celle a combustibile).

Se la ruota non è attuata, si dice che è **passiva**: il suo moto, comprese l'eventuale rotazione intorno al punto di contatto, dipende, in condizioni ideali di non strisciamento, dal moto dell'intera struttura a cui essa è vincolata.

2.2 Ruota semplice sterzante

La *ruota semplice sterzante* si differenzia dalla precedente per la presenza di un asse verticale di sterzo, che interseca idealmente l'asse di rotazione della ruota. L'asse di sterzo è anch'esso attuato da un motore elettrico, in modo diretto o mediante opportune scatole di riduzione; la sottostante ruota può essere, a sua volta, attuata o non attuata. Le Figg. 5 e 6 forniscono un'indicazione schematica di tali ruote.

2.3 Ruota basculante

Alcuni esempi di ruota basculante sono illustrati in Fig. 7. Si tratta di una ruota semplice sterzante, di solito con sterzo passivo, dove l'asse verticale di sterzo non interseca l'asse orizzontale di rotazione.

Queste ruote presentano un punto di contatto passivo con il suolo e, di solito, non contribuiscono né alla propulsione né alla sterzata; in Fig. 8 sono riportati gli assi e la velocità di avanzamento; in pratica, se la ruota basculante è passiva, la velocità sarà diretta in direzione opposta, in quanto, per effetto del moto del telaio, la ruota passiva tende a seguire l'asse di sterzata e non a precederlo.

2.4 Ruota omnidirezionale

Le ruote omnidirezionali, dette anche *swedish wheel*, sono illustrate in Fig. 9 a), b) e c). Come si vede dall'immagine, esse sono costruite in modo da avere sulla corona esterna alcuni cilindretti, di solito in materiale plastico, che ruotano intorno ad un asse tangente alla circonferenza della ruota, ossia a 90° rispetto all'asse di rotazione della ruota stessa. Per ragioni di robustezza, le ruote possono avere anche due corone con cilindretti sfalsati tra loro, come illustrato in Fig. 9 b) e c).

Esistono delle ruote omnidirezionali dove i cilindretti hanno gli assi orientati a 45° rispetto alla corona, come di può vedere dalla Fig. 11, che mostra due esempi di tali ruote.

Queste ruote permettono di avanzare in ogni direzione, in virtù del fatto che i cilindretti consentono di traslare anche in direzione ortogonale alla direzione di avanzamento della ruota.

Il movimento omnidirezionale si ottiene dotando il rover di tre o più ruote omnidirezionali attive, che vengono comandate in modo differenziale, secondo quanto si vedrà in dettaglio più oltre (Paragrafo 4.3.2).

2.5 Ruota sferica

Le ruote sferiche non sono molto comuni, soprattutto se attive. In Fig. 12 si mostra la vista dal basso di un rover sviluppato all'EPFL di Losanna, denominato "Tribolo"; esso rappresenta uno dei pochi casi di utilizzo di ruote sferiche attive per muovere un robot. Come si vede, le ruote sferiche sono costituite da sfere di materiale semirigido (gomma piena), collocate entro tre supporti che hanno lo scopo di mantenerle in sede; uno dei supporti è poi opportunamente motorizzato e costituito in modo tale da trasmettere efficacemente il moto alla ruota sferica.

Le ruote sferiche passive sono più comuni: la ruota in questo caso funge semplicemente da punto di contatto passivo con il suolo per supportare il telaio. Spesso, in caso di piccoli rover progettati per la ricerca, tali ruote vengono sostituite da supporti rigidi in materiale con basso coefficiente di attrito (teflon o altro) che svolgono la stessa funzione di supporto con minori complicazioni.

3 Configurazione dei robot a ruote

In Fig. 13 sono indicate le convenzioni grafiche con cui saranno rappresentati i vari tipi di ruota. Di solito il telaio del rover mette in evidenza soprattutto le ruote, in quanto sono le loro collocazioni che determinano i moti cinematici del rover. La vista è sempre dall'alto, salvo quando si vuole dare particolare risalto a strutture più complicate, e allora si fornisce una schema tridimensionale semplificato.

4 Cinematica dei robot a ruote

4.1 Generalità

Per descrivere la cinematica di un robot su ruote, si parte da alcune ipotesi di lavoro:

1. il moto avviene sempre su un piano ideale; la gravità non è considerata, così pure non viene considerato l'attrito o altri disturbi che alterino la perfetta planarità del moto.
2. il moto è sempre ideale: le ruote non possono strisciare sul piano, ma possono ruotare intorno al punto di istantanea rotazione, sia in virtù di un comando diretto sullo sterzo, sia in virtù della cinematica di tutto il telaio a cui sono collegate.
3. sono definiti sempre almeno due sistemi di riferimento cartesiani destrorsi:
 - ◇ Il primo — chiamato \mathcal{R}_0 — è il riferimento di base (inerziale o quasi), posto in un'origine O a scelta dell'utente, con gli assi descritti dai versori \mathbf{i}_0 e \mathbf{j}_0 .
 - ◇ Il secondo — chiamato \mathcal{R}_m o semplicemente \mathcal{R} — è solidale al robot mobile, ha un'origine in un punto opportuno dello stesso (di solito il baricentro o qualche altro punto di simmetria) e gli assi di solito orientati in modo che \mathbf{i}_m sia allineato al moto positivo (in avanti), e \mathbf{j}_m definito di conseguenza dalla convenzione dei sistemi destrorsi.
 - ◇ Entrambi i versori \mathbf{k}_0 e \mathbf{k} sono paralleli, allineati lungo la perpendicolare al piano, con verso uscente dal piano.

Le coordinate generalizzate che descrivono la cinematica di posizione del robot mobile sono le due coordinate $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{y}(t)$ rispetto a \mathcal{R}_0 e l'assetto del robot, dato come angolo $\theta(t)$ di \mathbf{i}_m rispetto a \mathbf{i}_0 ; il segno dell'angolo è dato dalla regola della mano destra applicata al versore \mathbf{k}_0 . Le coordinate generalizzate vengono convenzionalmente riassunte nel vettore

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

che prende il nome di “vettore delle coordinate cartesiane”.

L'angolo di rotazione θ viene rappresentato anche dalla matrice di rotazione \mathbf{R}_m^0 (o più semplicemente \mathbf{R}_m o ancora \mathbf{R}), che come è noto rappresenta il riferimento

\mathcal{R}_m nel riferimento \mathcal{R}_0 ; la matrice di rotazione vale, nello spazio 3D,

$$\mathbf{R}_m = \text{Rot}(\mathbf{k}_0, \theta) = \begin{pmatrix} c_\theta & -s_\theta & 0 \\ s_\theta & c_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

dove $s_\theta \equiv \sin(\theta(t))$ e $c_\theta \equiv \cos(\theta(t))$.

La matrice \mathbf{R}_m rappresenta anche l'operatore che trasforma la rappresentazione di un vettore (segmento orientato) \mathbf{w}_m in \mathcal{R}_m , nella rappresentazione dello stesso vettore \mathbf{w}_0 in \mathcal{R}_0 :

$$\mathbf{w}_0 = \mathbf{R}_m^0 \mathbf{w}_m \quad \text{con} \quad \mathbf{w}_m = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix}$$

Tipicamente questi segmenti orientati possono rappresentare la velocità del robot mobile oppure delle forze applicate ad esso.

Le matrici di rotazione godono di particolari proprietà, che vengono date per note e sono comunque ricavabili consultando [4].

Poiché il moto è essenzialmente planare, spesso — se non sempre — si trascura la coordinata z_m , per cui la matrice di rotazione diventa la sottomatrice 2×2 diagonale in alto, che comunque continueremo, per semplicità, a chiamare \mathbf{R}_m

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta \\ s_\theta & c_\theta \end{bmatrix}$$

Si può facilmente osservare che, nota una qualsiasi matrice di rotazione planare

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$$

l'angolo θ può essere ricavato utilizzando la funzione `atan2`:

$$\theta = \text{atan2}(r_{21}, r_{22}) = \tan^{-1} \left(\frac{r_{21}}{r_{22}} \right)$$

Per convenzione $\text{atan2}(0, 0) = \text{atan2}(0, c) = 0$ e $\text{atan2}(s, 0) = \pi/2$.

La derivata nel tempo del vettore delle coordinate cartesiane $\mathbf{p}(t)$ definisce le *velocità cartesiane* $\dot{\mathbf{p}}(t)$

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

La cinematica delle posizioni e delle velocità è quella funzione che permette di calcolare $\mathbf{p}(t)$ e $\dot{\mathbf{p}}(t)$ a partire da grandezze geometriche proprie del robot mobile (i cosiddetti “parametri geometrici”) e da variabili “interne” del robot stesso, come l’angolo di sterzo, la velocità di rotazione delle singole ruote e altre grandezze caratteristiche di quel particolare robot che si vuole studiare. In generale quindi si può dire che esiste una funzione \mathbf{f}_p che permette di calcolare $\mathbf{p}(t)$ e la si chiama **funzione cinematica diretta di posizione** del robot mobile:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{f}_p(\boldsymbol{\pi}, \mathbf{q}(t); t)$$

dove \mathbf{f}_p è una funzione vettoriale dei parametri geometrici $\boldsymbol{\pi}$ (ipotizzati costanti e noti) e delle variabili “interne” $\mathbf{q}(t)$ in generale funzione del tempo. Di solito la dipendenza diretta dal tempo è assente, per cui si può semplicemente scrivere

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{f}_p(\boldsymbol{\pi}, \mathbf{q}(t)) \quad (3)$$

Non è difficile intuire che la funzione cinematica di posizione è di tipo integrale, in quanto i parametri geometrici e le coordinate $\mathbf{q}(t)$ non sono sufficienti a determinare istantaneamente la posizione assoluta del rover rispetto al riferimento fisso.

Esse sono variabili ben diverse, ad esempio, dalle variabili interne di un braccio robotico ancorato ad un riferimento fisso. Questa situazione potrebbe mutare se fossero presenti sensori di posizione come i ricevitori GPS, o altri che consentano una localizzazione assoluta del rover.

La funzione cinematica di posizione si ottiene pertanto integrando, a partire dalle condizioni iniziali, la **funzione cinematica diretta di velocità** \mathbf{f}_v , espressa genericamente come

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{f}_v(\boldsymbol{\pi}, \mathbf{p}(t), \mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t); t)$$

Questa forma è la più generica possibile, ma molto spesso né $\dot{\mathbf{p}}(t)$ né $\mathbf{p}(t)$ dipendono direttamente dal tempo e quindi essa si semplifica in

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{f}_v(\boldsymbol{\pi}, \mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \quad (4)$$

Esempio 1

Consideriamo la Fig. 14; essa rappresenta uno schema semplificato del telaio di un robot mobile, a cui sono applicate tre ruote: quelle posteriori sono fisse e attuate, quella anteriore è sterzante e non attuata. Nella Figura sono indicate le grandezze cinematiche $\mathbf{p}(t) = (x(t) \ y(t) \ \theta(t))^T$, come pure la velocità della ruota anteriore $\mathbf{v}(t)$ che per le condizioni di non strisciamento deve essere orientata lungo l’asse principale della ruota.

l’insieme dei parametri geometrici $\boldsymbol{\pi}$ comprende:

- il raggio delle ruote posteriori fisse destra e sinistra, rispettivamente ρ_{pd} e ρ_{ps} ,
- il raggio della ruota anteriore sterzante ρ_a ,
- la distanza tra le ruote posteriori d ,
- la posizione della ruota anteriore e delle ruote posteriori in \mathcal{R}_m , rispettivamente \mathbf{r}_a e \mathbf{r}_p ,
- la velocità di rotazione delle ruote posteriori destra e sinistra e della ruota anteriore, rispettivamente $\dot{\theta}_{pd}$, $\dot{\theta}_{ps}$ e $\dot{\theta}_a$.

L'angolo di sterzata $\beta(t)$ è invece una coordinata locale, ad esempio $q_1(t) = \beta(t)$. Altre coordinate locali potrebbero essere, ad esempio, gli angoli $\theta_{pd}(t)$, $\theta_{ps}(t)$ e $\theta_a(t)$ e le velocità $\dot{\theta}_{pd}(t)$, $\dot{\theta}_{ps}(t)$ e $\dot{\theta}_a(t)$.

Poiché non sono ammessi strisciamenti delle ruote, si hanno i seguenti vincoli sulle velocità

$$\dot{\theta}_{pd}\rho_{pd} = \dot{\theta}_{ps}\rho_{ps} = \dot{\theta}_a\rho_a = \|\mathbf{v}(t)\|$$

Riprenderemo questo esempio più avanti, quando studieremo la cinematica complessiva del rover. ■

4.2 Cinematica della singola ruota

4.3 Cinematica del robot nel suo complesso

4.3.1 Centro di curvatura istantaneo

4.3.2 Comando differenziale delle ruote

Riferimenti bibliografici

- [1] R.C. Arkin, *Behaviour-Based Robotics*; MIT Press, 1998.
- [2] T. Balch, L.E. Parker (Editors), *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*, A K Peters, 2002.
- [3] G.A. Bekey, *Autonomous Robots: From Biological inspiration to Implementation and Control*, MIT Press, 2005.
- [4] B. Bona, *Modellistica dei Robot Industriali*, CELID, Torino, 2002.
- [5] H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L.E. Kavraki, S. Thurn, *Principles of Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*, MIT Press, 2005.
- [6] F. Cuesta, A. Ollero, *Intelligent Mobile Robot Navigation*, Springer, 2005.
- [7] G. Dudeck, M. Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2000.
- [8] R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Robots*, MIT Press, 2004.

Indice

1	Introduzione	3
2	Tipi di ruote	4
2.1	Ruota semplice non sterzante	5
2.2	Ruota semplice sterzante	6
2.3	Ruota basculante	6
2.4	Ruota omnidirezionale	6
2.5	Ruota sferica	7
3	Configurazione dei robot a ruote	7
4	Cinematica dei robot a ruote	8
4.1	Generalità	8
4.2	Cinematica della singola ruota	11
4.3	Cinematica del robot nel suo complesso	11
4.3.1	Centro di curvatura istantaneo	11
4.3.2	Comando differenziale delle ruote	11

Elenco delle figure

1	Tipi di ruota (da migliorare).	16
2	P è il punto di istantanea rotazione, sia per il moto in avanti, sia per l'eventuale sterzata.	17
3	Ruota semplice non sterzante: schema geometrico.	17
4	Ruota semplice non sterzante: grandezze cinematiche.	18
5	Ruota semplice sterzante: schema geometrico.	18
6	Ruota semplice sterzante: grandezze cinematiche.	19
7	Esempi di ruote basculanti.	19
8	Schema di ruota basculante.	20
9	Esempi di ruote omnidirezionali (dette anche "swedish wheel").	20
10	Gli assi della ruota e dei cilindretti sono a 90°	21
11	Due esempi di ruote omnidirezionali a 45° ; la ruota a) è di tipo a cilindretti chiusi, la ruota b) a cilindretti aperti.	21
12	esempio di ruota sferica.	22
13	Convenzioni usate per rappresentare le ruote.	22
14	Le grandezze cinematiche $x(t), y(t), \theta(t)$	23
15	Rover 1: triciclo sterzante.	23
16	Rover 2: triciclo a comando differenziale.	24
17	Rover 1: triciclo con ruote a guida differenziale e supporto su ruota omnidirezionale a 90°	24
18	Rover 3: quadriciclo a comando differenziale.	25
19	Rover 4: triciclo a ruote omnidirezionali.	26

Indice analitico

asse

di rotazione, 4

di sterzo, 4, 6

autonomia, 3

cinematica, 7

diretta di posizione, 9

diretta di velocità, 10

coordinate

cartesiane, 8

generalizzate, 8

cordone ombelicale, 3

parametri geometrici, 9

robot

autonomo, 3

non autonomo, 3

per esterni (*outdoor robot*), 4

per interni (*indoor robot*), 4

serpentiforme, 3

teleguidato, 3

ruota

attiva, 5

attuata, 5

basculante, 4

basculante passiva, 6

castor wheel, 4, 5

omnidirezionale, 5, 6

passiva, 6

semplice, 4

non sterzante, 5

sterzante, 6

sferica, 5, 7

sferica attiva, 7

sferica passiva, 7

swedish wheel, 5

velocità

cartesiane, 9

Figure

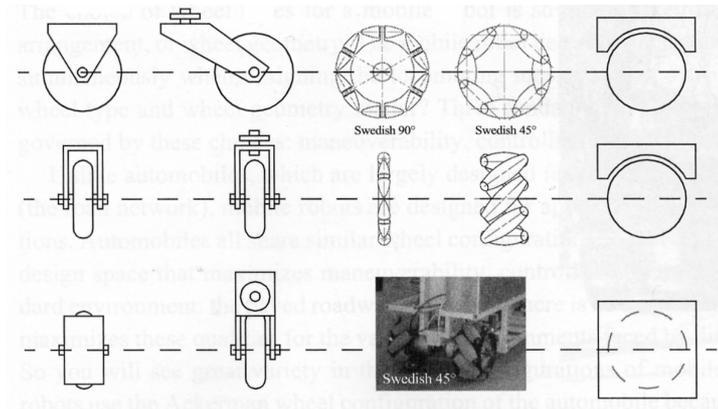


Figura 1: Tipi di ruota (da migliorare).

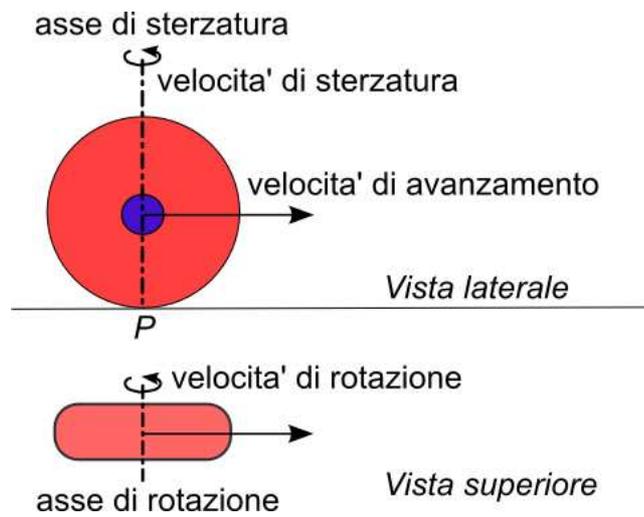


Figura 2: P è il punto di istantanea rotazione, sia per il moto in avanti, sia per l'eventuale sterzata.

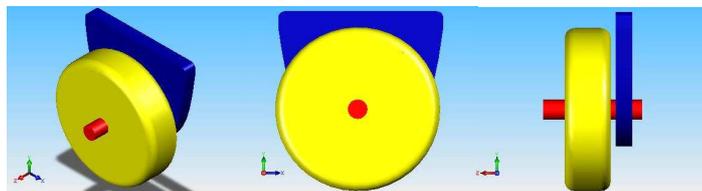


Figura 3: Ruota semplice non sterzante: schema geometrico.

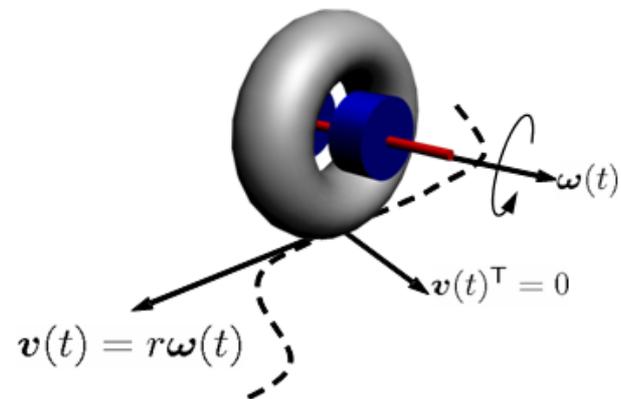


Figura 4: Ruota semplice non sterzante: grandezze cinematiche.

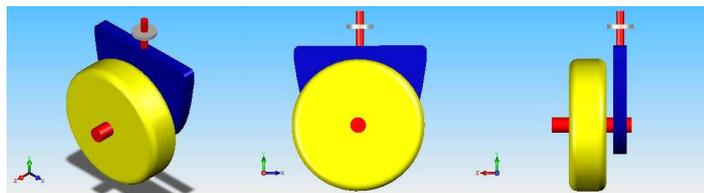


Figura 5: Ruota semplice sterzante: schema geometrico.

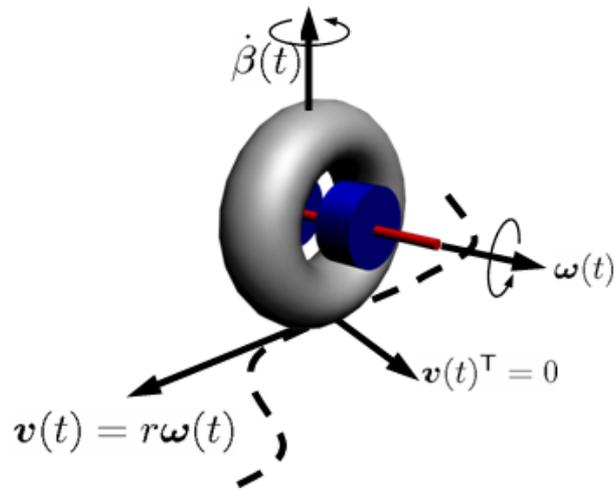


Figura 6: Ruota semplice sterzante: grandezze cinematiche.



Figura 7: Esempi di ruote basculanti.

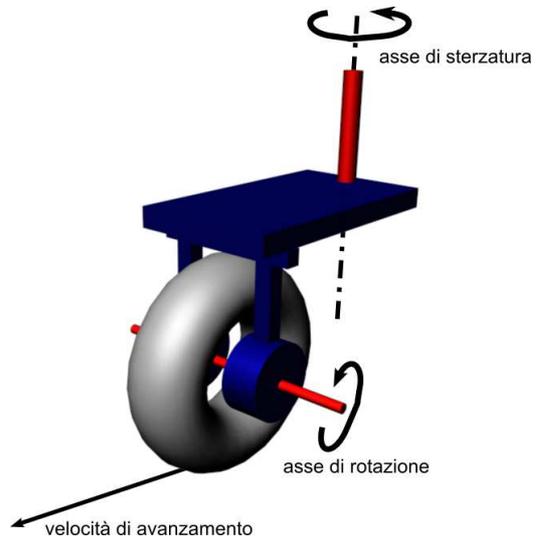


Figura 8: Schema di ruota basculante.

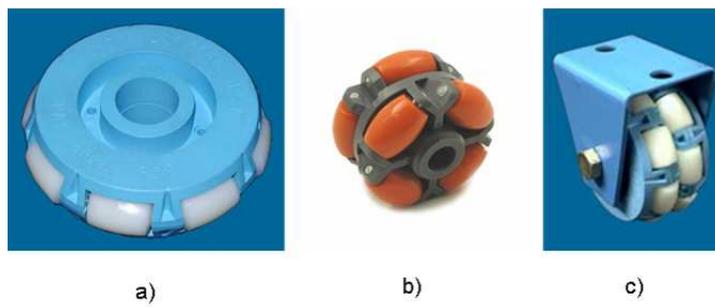
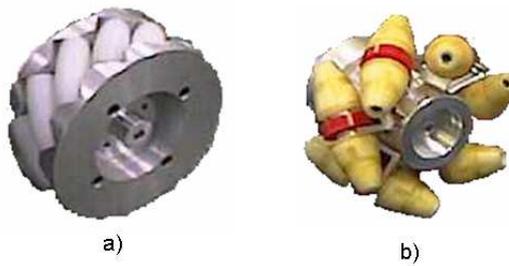


Figura 9: Esempi di ruote omnidirezionali (dette anche “swedish wheel”).

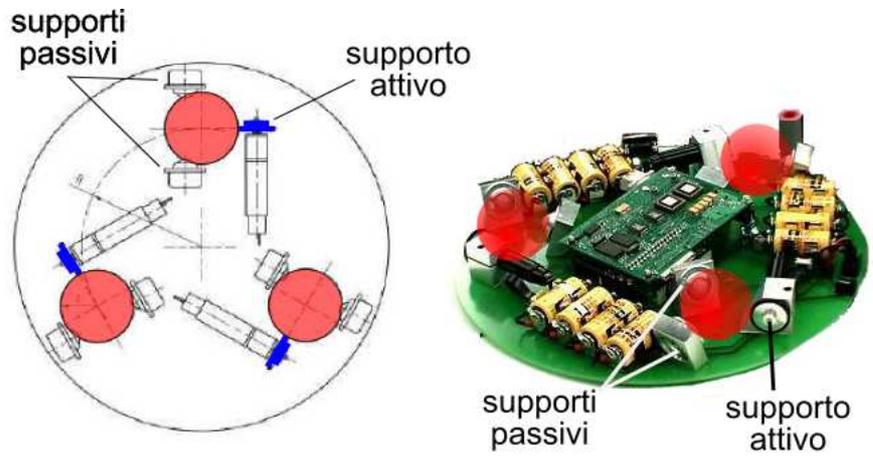


Figura 10: Gli assi della ruota e dei cilindretti sono a 90° .



./Figure/eps/swedish_wheel_45.eps

Figura 11: Due esempi di ruote omnidirezionali a 45° ; la ruota a) è di tipo a cilindretti chiusi, la ruota b) a cilindretti aperti.



./Figure/eps/tribolo.eps

Figura 12: esempio di ruota sferica.

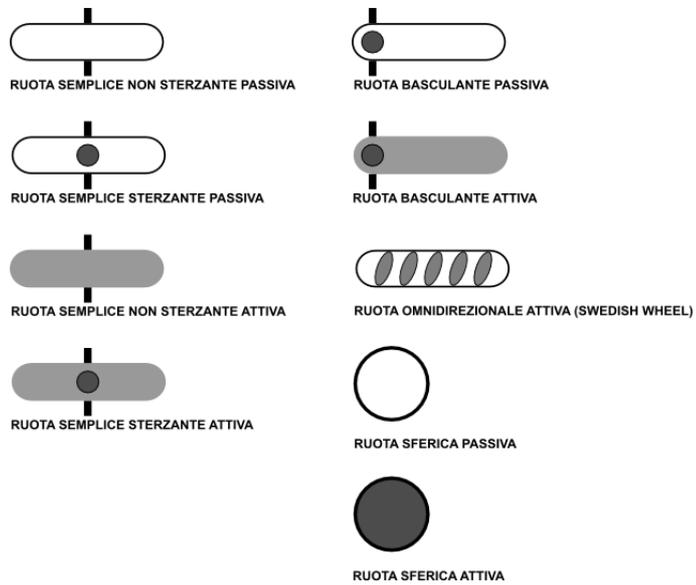


Figura 13: Convenzioni usate per rappresentare le ruote.

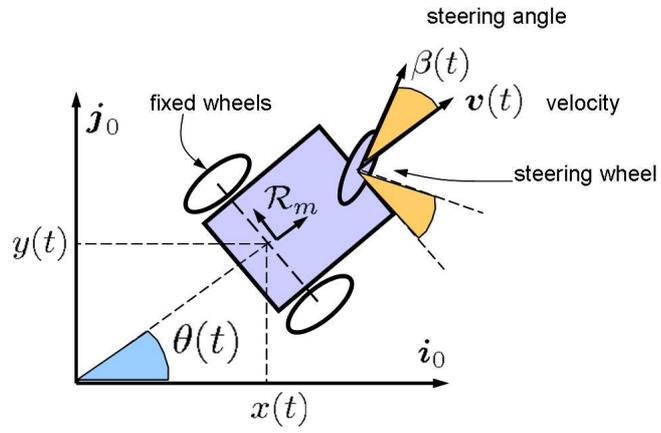


Figura 14: Le grandezze cinematiche $x(t), y(t), \theta(t)$.

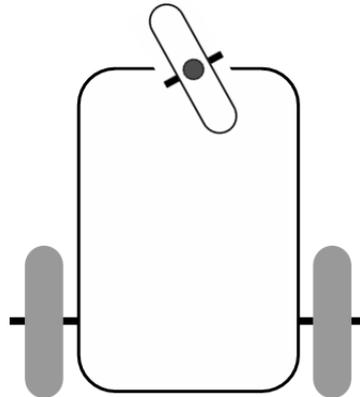


Figura 15: Rover 1: triciclo sterzante.

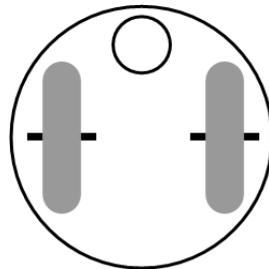


Figura 16: Rover 2: triciclo a comando differenziale.



Figura 17: Rover 1: triciclo con ruote a guida differenziale e supporto su ruota omnidirezionale a 90° .

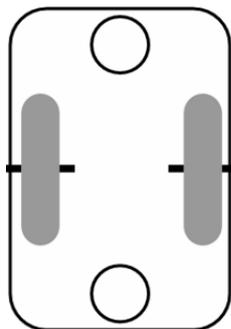


Figura 18: Rover 3: quadriciclo a comando differenziale.

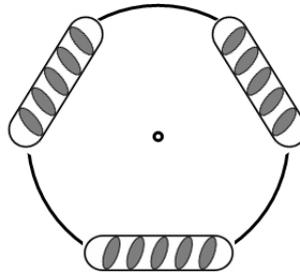


Figura 19: Rover 4: triciclo a ruote omnidirezionali.