



Unione Europea



Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in
INGEGNERIA MECCANICA
XII Ciclo N.S. (2010-2013)

Modello Dinamico di un Veicolo Cingolato
Dynamic Model of an Unmanned Tracked Vehicle

Marco Claudio De Simone

Il Tutor

Prof. Domenico Guida

Il Coordinatore

Prof. Vincenzo Sergi

ad Alison

Indice

1	Introduzione	9
2	Generalità	23
2.1	Locomozione	32
2.1.1	Robot mobili su gambe	36
2.1.1.1	Robot ad una gamba	40
2.1.1.2	Robot a due gambe (bipede)	43
2.1.1.3	Robot a quattro gambe (quadrupedi)	45
2.1.1.4	Robot a sei gambe (hexapod)	48
2.1.2	Robot Mobili su Ruote	50
2.1.2.1	Design delle ruote	51
2.1.2.2	Stabilità	53
2.1.2.3	Controllabilità	57
2.1.2.4	Azionamento sincronizzato	57
2.1.2.5	Azionamento omnidirezionale	59
2.1.2.6	Locomozione omnidirezionale con tre ruote sferiche.	60
2.1.2.7	Locomozione omnidirezionale con quattro ruote swedish.	60
2.1.2.8	Locomozione omnidirezionale con quattro ruote basculanti e otto motori.	61
2.1.2.9	Locomozione su cingoli	62
2.1.3	Robot Mobili con Azionamento Misto	63
2.2	Tecniche di localizzazione	65
2.2.1	Localizzazione relativa	65
2.2.1.1	Odometria	65
2.2.1.2	Encoder	66
2.2.1.3	Encoder ottici	67

2.2.1.4	Encoder in quadratura	69
2.2.1.5	Navigazione inerziale	70
2.2.1.6	Bussole	70
2.2.1.7	Giroscopi	72
2.2.1.8	Accelerometri	73
2.2.1.9	Inertial measurement unit (IMU)	74
2.2.1.10	Il filtro di Kalman	74
2.2.1.11	Kalman filter localization	75
2.2.2	Localizzazione assoluta	76
2.2.2.1	Metodo Route-based	76
2.2.2.2	Localizzazione tramite landmark	77
2.2.2.3	Beacon based localization	79
2.2.2.4	Active Ranging Systems	82
2.2.2.5	Ultrasonic Rangefinder	82
2.2.2.6	Laser Range Finder	83
2.2.2.7	Map-based positioning	83
2.2.2.8	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)	84
2.2.2.9	Localizzazione Probabilistica	86
2.2.2.10	Approccio Bayesiano alla localizzazione	86
2.2.2.11	Localizzazione Markov	88
2.2.2.12	Monte Carlo Localization	89
2.3	Terramechanics	90
2.3.1	Ruolo della Terramechanics	91
2.3.2	Alcune questioni fondamentali sulla Terramechanics	95
2.3.3	Modellazione del comportamento del terreno	98
2.3.4	Misura e caratterizzazione delle proprietà del terreno	99
2.3.5	Modellazione dell'interazione veicolo-terreno	104
2.3.6	Approcci alla Terramechanics	105
2.3.7	Modellazione del terreno	105
2.3.7.1	Modellazione del terreno come un mezzo elastico	107
2.3.7.2	Modellazione del terreno come un mezzo plastico	117
2.4	Dinamica e Cinematica di Veicoli Off-Road	124
2.4.1	Fattori che influiscono sulla dinamica dei veicoli Off-road	125
2.4.1.1	Resistenza aerodinamica	127
2.4.1.2	Resistenza al moto di un veicolo in movimento	127
2.4.2	Metodi per la valutazione della performance di veicoli cingolati	129

2.4.2.1	Metodi empirici	129
2.4.2.2	Metodo parametrico	130
2.4.3	Modelli Cinematici per Veicoli Cingolati	138
3	Le macchine agricole	143
3.1	Macchine Semoventi (Motore Proprio)	143
3.2	Macchine Trainate (Prive di Motore)	144
4	Modellazione Multi-body	149
4.1	Meccanica dei corpi rigidi	152
4.2	Cinematica	153
4.3	Dinamica	156
4.4	Moto Vincolato	160
5	Sviluppo di una procedura per identificazione e controllo di veicoli autonomi	163
5.1	Generalità sulla dinamica, identificazione e controllo di sistemi meccanici lineari	163
5.1.1	Equazioni del moto	163
5.1.2	LQ Optimal Regulation	165
5.1.3	Modello dell'Osservatore	166
5.1.4	Feedforward Control	167
5.2	Identificazione e Controllo dell'UGV	172
5.3	Identificazione e Controllo dell'UTV	177
5.3.1	Identificazione	178
5.3.2	LQR Control	180
6	Discussione e conclusioni	183

Capitolo 1

Introduzione

Per anni, quasi tutti gli aerei commerciali hanno avuto la capacità di operare con il pilota automatico. I computer di bordo sono in grado di gestire la maggior parte degli aspetti del volo, tra cui anche gli aspetti di decollo e atterraggio. Le petroliere e le navi da carico che trasportano la maggior parte delle merci per l'economia globale sono altamente automatizzate, permettendo loro di operare con equipaggi ridotti. Ora, anche le auto ed i camion dotati di auto pilota stanno diventando una realtà, consentendo una potenziale rivoluzione nel trasporto su gomma che potrebbe, se i regolamenti lo consentiranno, di essere a buon punto entro il 2025. I veicoli autonomi possono offrire diversi potenziali vantaggi, compresa la riduzione dei morti per incidenti stradali e la riduzione delle emissioni di CO_2 . Con i computer che controllano l'accelerazione, i freni e lo sterzo, auto e camion con distanze di sicurezza ridotte, possono viaggiare tranquillamente a velocità più elevate; quando un veicolo in linea frena o accelera, lo fanno anche gli altri veicoli. Poiché la maggior parte degli incidenti alla guida sono causati da errori umani, rimuovendo i guidatori si potrebbe effettivamente aumentare la sicurezza stradale e ridurre le morti, i feriti, ed i danni alle cose. Convogli di camion potrebbero accelerare lungo la strada, senza bisogno di alcun guidatore (o con un unico conducente presente nel camion di testa), lasciando una distanza di sicurezza di un metro tra i veicoli¹. Le autostrade potrebbero ospitare più veicoli senza dover espandere la rete, e l'accelerazione e la frenata potrebbe essere ottimizzate per ridurre il consumo di carburante e le emissioni di CO_2 . Inoltre, i veicoli ravvicinati possiedono una più bassa resistenza aerodinamica, che riduce ulteriormente il consumo di carburante.

¹Brian Dumaine, The driverless revolution rolls on, Fortune, November 12, 2012

I guidatori potrebbero essere liberi di usare il proprio tempo in auto per lavorare, rilassarsi, o socializzare durante il viaggio.

Se le autorità di regolamentazione dovessero approvare la guida autonoma e l'opinione pubblica dovesse accettare l'idea, i benefici ottenuti da una maggiore sicurezza, un maggiore risparmio di tempo, un aumento della produttività e un minore consumo di carburante e di emissioni potrebbero avere un impatto economico totale dai 200 miliardi di dollari ai 1.900 miliardi di dollari all'anno entro il 2025. La tecnologia non è probabilmente il più grande ostacolo alla realizzazione di questi obiettivi. Infatti, dopo 20 anni di lavoro sui sistemi avanzati di visione artificiale, sull'intelligenza artificiale e sulla sensoristica, la tecnologia per costruire veicoli autonomi è a portata di mano, come un numero crescente di veicoli sperimentali di successo hanno dimostrato. Cosa più probabile è che a rallentare l'adozione di tali tecnologie sia la realizzazione di un quadro normativo necessario e vincere il sostegno pubblico.

Definizione Un veicolo autonomo è un veicolo che può manovrare con intervento umano ridotto o nullo. Auto e camion autonomi, possiedono il maggiore potenziale di impatto economico significativo entro il 2025. Altre forme di veicoli autonomi come gli aerei-drone per l'irrorazione delle colture, o come i carrelli elevatori auto-guidati, o i droni per operazioni di polizia verranno ampiamente utilizzati, ma sono applicazioni più limitate e di minor impatto escludendo i veicoli militari nel contesto di questa relazione.

La visione artificiale è una tecnologia chiave abilitante per i veicoli autonomi. Utilizzando telecamere e altri sensori, un computer controlla costantemente la strada e l'ambiente circostante, acquisendo un'immagine da cui poi estrarre informazioni rilevanti (ad esempio segnali di stop o oggetti nel suo percorso) su cui basare le azioni. I progressi nella visione artificiale includono telecamere 3D che raccolgono informazioni aggiuntive relative alle distanze che le telecamere bidimensionali non possono fornire. Software di riconoscimento del modello, compresi i programmi di riconoscimento ottico dei caratteri, sono in grado di interpretare simboli, numeri e bordi degli oggetti di un'immagine. Il LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging), che è simile al radar ma utilizza la luce laser che rimbalza sugli oggetti piuttosto che segnali radio per misurare la distanza, è anche utilizzato dai veicoli autonomi, insieme con la tecnologia GPS (Global Positioning System). Combinati tali informazioni con i dati dei sensori, queste informazioni permettono ai veicoli autonomi di individuare le loro posizioni attuali, seguire la

strada, e procedere verso le loro destinazioni. I segnali di ingresso dei sensori della macchina sono integrati con i dati spaziali memorizzati dal software di intelligenza artificiale per decidere come il veicolo dovrebbe operare sulla base di regole del traffico (ad esempio, obbedendo ai limiti di velocità ed ai segnali) e sulla conoscenza delle eccezioni (come ad esempio l'arresto quando la luce è verde ma un pedone si trova nella intersezione). L'ingegneria del software di controllo guida il veicolo, dando istruzioni agli attuatori che svolgono l'attività necessaria per l'azione desiderata, accelerando, frenando, o sterzando. Grazie a queste funzionalità, un veicolo completamente autonomo, può viaggiare verso una specifica destinazione, muovendosi in modo sicuro tra gli altri veicoli, tra eventuali ostacoli e pedoni. I computer di questi veicoli possono inoltre ottimizzare il risparmio di carburante accelerando e frenando senza problemi, rimanendo entro il limite di velocità, e non prendendo strade sbagliate. Google ha dimostrato queste capacità con una Toyota Prius che è stata dotata di computer, sensori, attuatori ed altre tecnologie; questo veicolo è stato guidato per 300.000 miglia con un solo incidente (causato da un pedone). Sistemi autonomi per il mantenimento della posizione della vettura tra le strisce delle corsie, per la gestione delle frenate e delle accelerazioni per mantenere costante la distanza dai veicoli che precedono, e la frenata automatica in presenza di ostacoli sono già offerti o saranno presto offerti su veicoli in produzione di serie. Nel prossimo decennio, possiamo aspettarci che la guida autonoma verrà offerta quale optional sulle nuove automobili, inizialmente su modelli di fascia alta e poi su veicoli di fascia media. Alla fine, la guida autonoma potrebbe dare origine a nuovi tipi di veicoli. Questi potrebbero includere autovetture senza conducente (che non richiedono un sedile per il guidatore per sedersi al volante) che potrebbero essere configurati per ottimizzare lo spazio di lavoro o persino fornire posti letto per i passeggeri o nuovi veicoli per il trasporto pubblico che consentirebbero una maggiore flessibilità e personalizzazione.

Una potenziale accelerazione La guida autonoma potrebbe inaugurare una nuova era per le automobili. Durante il secolo scorso, l'automobile era una tecnologia innovativa general-purpose che ha fornito i mezzi per far ottenere ai lavoratori il loro lavoro e ai consumatori le merci. Le automobili hanno permesso lo sviluppo economico e standard di vita più elevati in tutto il mondo. I camion hanno diffuso lo sviluppo economico ed i mercati in zone dove le ferrovie, i fiumi ed i canali non sono mai stati in grado di raggiungere. Tuttavia, queste macchine hanno anche causato un aumento

dell'inquinamento, una impennata della domanda di combustibili fossili, e la congestione e la perdita di produttività correlati, così come la morte e lesioni. Il guidatore americano medio trascorre in auto 750 ore annue alla guida, l'equivalente di quattro mesi di lavoro mentre la media europea è di circa 300 ore². Più di un milione di persone muoiono in incidenti stradali ogni anno in tutto il mondo, ed è stimato che tra il 70 ed il 90 per cento di tutti gli incidenti automobilistici sono causati da cattivi comportamenti umani alla guida³. La maggior parte di questi problemi potrebbero essere evitati utilizzando veicoli autonomi. In tutto il mondo, i veicoli autonomi hanno il potenziale per migliorare l'economia dei trasporti. I camion autonomi per il trasporto merci su lunghe distanze potrebbero adattarsi facilmente ai sistemi di trasporto e logistica intermodale. Convogli in movimento di camion potrebbero trasportare merci sulle principali arterie, trasferire i loro carichi presso i centri di distribuzione regionali, da cui altri veicoli potrebbero portare il carico alle sue destinazioni finali. Sulle lunghe percorrenze, i camion autonomi non avrebbero bisogno di fermarsi per far dormire e mangiare i loro autisti. La tecnologia per i veicoli autonomi è evoluta alla velocità della luce. Nel 2004 DARPA ha sponsorizzato un premio di 1 milione di dollari per veicoli senza guidatore per una gara nel deserto del Mojave chiamato il DARPA Grand Challenge. Nessuna squadra completò la gara. Un anno dopo, nel 2005, cinque vetture hanno attraversato con successo il traguardo. Nel 2007 si è tenuta una versione più urbana della gara incorporando segnali stradali, ostacoli e traffico; sei squadre raggiunsero il traguardo⁴. Oggi, le automobili autonome di Google stanno guidando su strade e autostrade (con un pilota umano al volante nel caso in cui il sistema abbia un problema) negli stati della California e Nevada. Google ha annunciato che si aspetta di avere una versione disponibile in commercio della sua tecnologia pronta in 3-5 anni. La tecnologia che è in fase di test oggi aggiungerebbe migliaia di dollari al prezzo di una macchina, ma il costo di questi sistemi è previsto per diminuire. Ad esempio, i ricercatori dell'Università di Oxford hanno l'obiettivo di sviluppare un sistema autonomo che dovrebbe costare fino a 150 dollari⁵. Anche se il quadro normativo per veicoli autonomi non si è ancora

²Mobility choices: Consumers at the wheel, McKinsey & Company survey, June 2012.

³Hans von Holst, ed., Transportation, traffic safety and health: The new mobility, Springer Publishing, 1997.

⁴Darpagrandchallenge.com.

⁵Researchers testing frugal autonomous car systems, aim for \$150 price tag, Engadget.com; R. W. Wall, J. Bennett, G. Eis, Creating a low-cost autonomous vehicle, presented at Industrial Electronics Society annual conference in Sevilla, Spain, November 5-8,

evoluto (California e Nevada stanno permettendo test su strade pubbliche), le principali case automobilistiche si stanno portando avanti con lo sviluppo di tali sistemi. General Motors, Toyota, Mercedes-Benz, Audi, BMW e Volvo stanno testando i propri sistemi autonomi. Audi sta testando quello che definisce un'auto pilotata in grado di gestire partenze e fermate nel traffico pesante e parcheggiarsi da sola⁶. Il conducente può comunque assumere il controllo del veicolo in qualsiasi momento ed dovrebbe sempre monitorare la guida del veicolo. Cadillac ha creato un migliorato sistema di cruise-control che controlla non solo la velocità, ma controlla anche il servosterzo sulle autostrade. Nel 2014, Mercedes-Benz Classe S è in arrivo con una serie di tecnologie avanzate, sebbene non complete comprese il mantenimento di una corsia e della velocità e della distanza da altre vetture. Queste capacità saranno accessibili solo in determinate condizioni di guida e il guidatore dovrà tenere le mani sul volante, ma i suoi sviluppatori sostengono che il sistema di visione di bordo potrà tenere la macchina nella sua corsia e mantenere le distanze di sicurezza rispetto ad altri veicoli. Nel traffico congestionato, la vettura sarà in grado di monitorare l'ambiente e capire quando accelerare e quando frenare⁷. In Giappone l'organizzazione per lo sviluppo di nuove Energie e Tecnologie Industriali ha testato con successo un sistema di trasporto autonomo, in cui un singolo guidatore porta altri tre camion che sono dotati di sistemi radar, viaggiando a 50 miglia all'ora, distanziati di circa quattro metri. I veicoli autonomi On-site vengono inoltre testati dal gigante minerario Rio Tinto. L'azienda ha utilizzato 150 camion in parte autonomi nel settore minerario australiano. I camion seguono un percorso predefinito e caricano e scaricano materiale senza operatore.

Impatto economico potenziale Il potenziale impatto economico di automobili e camion autonomi potrebbe essere dai 200 miliardi dollari a 1.900 miliardi dollari all'anno entro il 2025. Questo è un valore indicativo dei benefici della tecnologia che potrebbero essere realizzati se ai veicoli autonomi fossero consentiti dalle normative e adottati dai consumatori. Il più grande impatto sarebbe quello di liberare del tempo per i conducenti, una maggiore sicurezza stradale e un costo ridotto di funzionamento dei veicoli. Si stima

2002.

⁶Angus MacKenzie, The future is here: Piloted driving in Audi's autonomous A6, MotorTrend, January 2013.

⁷Andrew English, New car tech: 2014 Mercedes-Benz S-class, Road & Track, November 2012.

che dalle 30.000 alle 150.000 vite potrebbero essere salvate ogni anno dal 2025 se questa tecnologia venisse adottata e che le emissioni di CO_2 potrebbero essere ridotte di ben 300 milioni di tonnellate all'anno, importo pari al 50 per cento delle emissioni di CO_2 del settore aeronautico⁸. Le vetture autonome potrebbero avere un potenziale impatto economico dai 100 miliardi ai 1.400 miliardi di dollari all'anno nel 2025. Ciò presuppone che dal 75 al 90 per cento delle auto vendute nel periodo 2017-2020 nel segmento di fascia alta, così come dal 20 al 30 per cento delle auto nel segmento di fascia media, potrebbero essere autonome. Ciò significa avere una percentuale che va dal 10 al 20 per cento dei 1,2 miliardi di auto private su strada nel 2025 aventi capacità di self-drive in tutte le situazioni di traffico. L'assegnazione di un valore dai 2 agli 8 dollari per ora di tempo che potrebbe essere recuperato (a seconda di fattori quali il grado di autonomia dell'auto e la potenziale legislazione che richiede al conducente di prestare attenzione alla strada) alla guida, si stima che potrebbero essere salvati nel tempo dai 100.000 milioni di dollari al trilione per anno entro il 2025⁹. È stato calcolato che la seconda più grande fonte di risparmio è la riduzione dei decessi dovuti ai veicoli. Si stima che la tecnologia autonoma sia in grado di ridurre gli incidenti stradali dal 5 al 20 per cento complessivo. Questo presuppone che le automobili autonome non saranno soggetti al tipo di incidenti che sono causati dal comportamento umano. Questo potrebbe ridurre i decessi annuali di automobilisti da 30.000 a 140.000 l'anno a livello globale nel 2025¹⁰.

Potrebbe essere possibile, attraverso l'uso della tecnologia autonoma, un risparmio di carburante del 15 al 20 per cento. I veicoli autonomi possono essere programmati per eliminare dal 10 al 15 per cento dei residui della combustione che si verificano ad ogni rapida accelerazione e variazioni di velocità. Inoltre, poiché i sensori su ogni vettura rispondono immediatamente alle azioni delle vetture che seguono, le automobili autonome potranno viaggiare a più stretto contatto, riducendo la resistenza dell'aria e migliorando l'efficienza del carburante dal 15 al 20 per cento quando i veicoli viaggiano

⁸Introduction of aviation into the European Union emissions trading scheme, Econometrica Press summary paper, May 2009.

⁹Sulla base delle stime del Dipartimento dei Trasporti Americano sul valore del tempo nel trasporto (\$ 7 a \$ 19 per ora) per i diversi stati degli Stati Uniti. Il Bureau of Labor Statistics degli Stati Uniti stima il valore del tempo di lavoro a 16 dollari all'ora. È stato scelto il range \$ 2 - \$ 8 per ora, perché l'intero valore del tempo non può essere recuperato, trovandosi il guidatore ancora in auto.

¹⁰È stato utilizzato un valore intero per QALY (Quality-Adjusted Life Year) del valore di 100.000 dollari per le economie avanzate e 50.000 dollari per il resto del mondo in via di sviluppo, con il tasso di sconto del 4 per cento all'anno.

Sized applications of autonomous and near-autonomous vehicles could have direct economic impact of \$200 billion to \$1.9 trillion per year in 2025



Sized applications	Potential economic impact of sized applications in 2025 \$ trillion, annually	Estimated scope in 2025	Estimated potential reach in 2025	Potential productivity or value gains in 2025
Autonomous cars	0.1–1.4	<ul style="list-style-type: none"> 900 million new cars produced in or after 2018 500 hours per year spent in car by average owner 	<ul style="list-style-type: none"> 5–20% of all driving autonomous <ul style="list-style-type: none"> – 20–30% of cars sold from 2017–20 with potential to be autonomous – 50–100% driving time spent under full computer control 	<ul style="list-style-type: none"> \$2–8 per hour in value of time saved 70–90% fewer accidents 15–20% gain in fuel efficiency
Autonomous trucks	0.1–0.5	<ul style="list-style-type: none"> 24 million trucks produced in 2018 or later 	<ul style="list-style-type: none"> 10–30% of new trucks with autonomous driving capabilities 50% driven by human drivers 	<ul style="list-style-type: none"> 70–90% fewer accidents 10–40% greater fuel efficiency 1–2 drivers per 10 trucks (for monitoring)
Other potential applications (not sized)				
Sum of sized potential economic impacts	0.2–1.9	<ul style="list-style-type: none"> Potential applications not sized include commercial drones, military drones, and/or autonomous and near-autonomous submersible vehicles for applications such as fossil fuels exploration 		

Figura 1.1: NOTA: Le stime del potenziale impatto economico sono valutate solo alcune applicazioni e non sono stime globali dell'impatto potenziale totale. Le stime includono surplus del consumatore, e non possono essere collegati al potenziale di ricavi della società, delle dimensioni del mercato, o l'impatto sul PIL. Le somme dei numeri possono non trovarsi a causa degli arrotondamenti.

FONTE: McKinsey Global Institute analysis, 2013

in convoglio¹¹. Le conseguenti emissioni di CO_2 , potrebbero ridursi dalle 20 ai 100 milioni di tonnellate per anno.

Supponendo che i camion autonomi possano percorrere lunghe distanze con ridotte distanze tra un mezzo ed un altro e che i guidatori non sarebbero necessari nella maggior parte dei veicoli, sull'autotrasporto ci potrebbe essere un potenziale impatto economico dai 100 miliardi a 500 miliardi dollari all'anno nel 2025. Pensiamo che sia possibile che tra il 2017 e il 2025, dal 10 al 30 per cento degli autocarri venduti saranno almeno parzialmente autonomi. I camion autonomi potenzialmente potrebbero essere utilizzati per la guida autostradale a lunga distanza. Tuttavia, su distanze più brevi, o per le consegne locali, ci sarà ancora bisogno di un guidatore. Ma anche nelle consegne locali si potrebbe beneficiare dalle caratteristiche di guida autonoma per migliorare l'efficienza energetica e la sicurezza.

La metà dei camion autonomi potrebbe avere ancora un guidatore (per fornire servizi o effettuare consegne, per esempio); per convogli di camion completamente autonomi, ci potrebbero essere uno o due piloti per ogni decina di camion. Se l'adozione di camion autonomi avviene ai tassi calcolati, si stima che l'impatto economico sulla produttività potrebbe andare dai 100 miliardi di dollari ai 300 miliardi l'anno nel 2025. Camion autonomi potrebbero anche prevenire dalle 2.000 ai 10.000 morti per incidenti all'anno nel 2025 (come per le autovetture, dal 70 al 90 per cento degli incidenti in cui un camion è coinvolto, sono causati dal comportamento umano, come addormentarsi al volante).

Basato su una tecnologia in continua evoluzione, è possibile che i camion autonomi potrebbero essere distanziati di meno di tre metri di distanza durante la guida, riducendo il consumo di carburante dal 15 al 20 per cento, riducendo drasticamente la resistenza dell'aria. In combinazione con il controllo della velocità ottimizzata rendere efficiente il consumo del carburante, si stima che i camion autonomi possano utilizzare dal 10 al 40 per cento di carburante in meno rispetto agli autocarri non autonomi.

Barriere e fattori abilitanti I governi avranno un ruolo centrale nel determinare se il valore potenziale degli veicoli autonomi sarà espresso a pieno. Gli sforzi dei governi per incoraggiare lo sviluppo e l'adozione definitiva di automobili e camion autonomi potrebbero notevolmente accelerare il loro

¹¹Kevin Bullis, How vehicle automation will cut fuel consumption, MIT Technology Review, October 24, 2011.

impatto, contribuendo a superare le preoccupazioni circa la tecnologia, la sicurezza, e le responsabilità legali. Le leggi in materia di guida autonoma saranno un incentivo molto importante. Se i governi stabiliranno norme che lasceranno i veicoli autonomi viaggiare su strade pubbliche, forniranno una base su cui costruire un nuovo approccio al trasporto via gomma. Tuttavia, se i regolamenti vietano ai conducenti di togliere le loro mani dal volante in qualsiasi circostanza, l'incentivo al consumatore derivato dal tempo di guida salvato non si materializzerà.

Se i politici decideranno che i benefici dei veicoli autonomi costituiranno un importante bene pubblico, possono massimizzare i benefici investendo in sistemi intelligenti le infrastrutture stradali che renderebbero la guida più sicura. Nelle strade verranno incorporati sensori per fornire precise informazioni di posizionamento e sui limiti di velocità. Altri elementi includerebbero sensori agli incroci per dire se il veicolo può procedere o se al semaforo la luce è rossa o verde, per esempio. In questo modo, la strada intelligente assume molti compiti complessi venendo coinvolta nella guida del veicolo in modo sicuro. Purtroppo è poco probabile che ingenti investimenti in strade intelligenti verranno effettuati entro il 2025. Tuttavia, l'adozione di veicoli autonomi accelererà, potrebbe esercitare una pressione notevole per investimenti sulle corsie riservate ai veicoli autonomi e sulla sensoristica stradale per massimizzare, da parte dei proprietari, i benefici di veicoli autonomi.

Nonostante il progresso tecnologico che ora viene visto nei veicoli sperimentali, questi sistemi richiedono ancora una grande quantità di miglioramento. Continua ricerca è richiesta sui settori della visione, del pattern recognition, della intelligenza artificiale e delle tecnologie per tenere conto di imprevisti nelle infrastrutture (per esempio, cosa fare quando le linee di demarcazione delle corsie sono oscurate o se il traffico viene deviato in giro per lavori).

Implicazioni Veicoli autonomi hanno un potenziale significativo per trasformare il trasporto su gomma, creando molte opportunità per le imprese e affrontare molte esigenze della società. Essi hanno anche il potenziale per influenzare tutti coloro che utilizzano una vettura, tutte le industrie legate alle automobili e camion e sistemi logistici intermodali. Veicoli autonomi potrebbero creare grandi opportunità per i nuovi attori nel settore automobilistico, comprese le nuove tipologie di concorrenti provenienti dal settore dell'IT. Oltre a fornire i veicoli intelligenti per manovrare autonomamente, le aziende possono trovare nuovi settori di business che capitalizzano il tempo libero dei conducenti trasformati in passeggeri (servizi di intrattenimento e strumenti di produttività dei lavoratori progettati per l'utilizzo in auto, ad

esempio). Esiste la possibilità che pochi giocatori che dominano il mercato dei veicoli autonomi, possano creare gli standard per i sistemi operativi e le interfacce di programmazione che potrebbero influenzare i requisiti normativi. I primi concorrenti ne potrebbero quindi beneficiare. A mano a mano che i sistemi autonomi diventeranno sempre più accettati, ci saranno opportunità di sviluppo di nuovi tipi di autovetture senza conducente. Ciò potrebbe aprire il mercato a nuovi costruttori di veicoli o invitare concorrenti di altri settori ad entrare nel mercato, ma potrebbe anche ridurre i tassi di auto private.

Il successo di automobili e camion autonomi potrebbe cambiare anche il settore delle assicurazioni auto. Una significativa riduzione degli incidenti stradali portare ad una corrispondente riduzione dei premi. Tuttavia, un certo grado di responsabilità personale probabilmente rimarrà.

Veicoli autonomi potrebbero avere effetti molto negativi sul settore degli autotrasporti. Negli Stati Uniti, ci sono circa 3,5 milioni di camionisti. La domanda per i camionisti a lunga percorrenza si ridurrebbe in modo significativo, relegando la guida di camion per l'ultimo tratto del trasporto e per la consegna. Le aziende dovrebbero cominciare a lavorare con i dipendenti per gestire questo cambiamento prima di questa transizione. Il lavoro di camionista potrebbe arrivare a coinvolgere un maggiore servizio al cliente, per esempio. Altri lavori di guida, come i tassisti e autisti di autobus, potrebbero anche essere a rischio nel lungo termine.

I responsabili politici dovranno elaborare norme per veicoli autonomi. I produttori di automobili potrebbero non rischiare di assumere la responsabilità dei veicoli senza conducente, ad esempio, sistemi come quelli che saranno disponibili sulla prossima Mercedes-Benz Classe S sono progettati per disattivarsi se il conducente toglie anche una sola mano dallo sterzo al disopra di determinate velocità.

I responsabili politici dovrebbero anche pianificare modi per massimizzare il valore di autonomia di un veicolo per l'economia e la società. Ciò dovrebbe includere le infrastrutture e una pianificazione di lungo termine che tenga conto dei veicoli autonomi (ad esempio, la creazione di corsie riservate ai veicoli autonomi e strade dotate di sensoristica). I veicoli autonomi potranno anche presentare problemi di sicurezza legittime. Come ogni sistema informatico, un sistema di guida autonoma di un'auto potrebbe essere violato, con risultati potenzialmente disastrosi. Sistemi di sicurezza informatica robusti dovranno essere sviluppati prima che questa tecnologia prenda piede.

Obiettivo della tesi L'obiettivo della tesi è la modellazione dinamica di un veicolo cingolato off-road [1, 2, 4], e lo sviluppo di una legge di controllo che lo renda autonomo [7]. L'obiettivo del controllo, è rendere il veicolo capace di operare in completa sicurezza ed autonomia su terreni con angoli di pendenza massima pari a 20° . Il sistema, denominato UTV (Unmanned Tracked Vehicle), è pensato per il trasporto di merci su terreni sconnessi con forte pendenze e di difficile accesso. La propulsione è data da un motore a combustione interna a quattro tempi e con una geometria pari a 180 mm di larghezza, una carreggiata di 670 mm e una lunghezza di impronta di 580mm. La modellazione è stata sviluppata in ambiente Solidworks che integrato con il software SimMechanics della Mathworks ha permesso la realizzazione di un modello multi-body. Tale modello è stato impiegato per la progettazione di leggi di controllo in open loop e closed loop, avendo definito un opportuno set di attuatori e di sensori. Le leggi di controllo, definite in simulazione sono state implementate sulla macchina e, mediante una procedura di identificazione N4SID si è ottenuto il relativo modello dinamico identificato [19]. Su tale ultimo modello si è sviluppato una legge di controllo ottima in retroazione al fine di rendere robusto il controllo [8, 9, 10]. Il flowchart nella figura 1.2 riporta il diagramma di flusso della seguente procedura :

1. Realizzazione di un modello CAD in ambiente CAE MultiBody
2. Progetto di un insieme di leggi di controllo in anello aperto in ambiente CAE Simulink
3. Implementazione della leggi in OpenLoop sul sistema reale
4. Identificazione di modelli dinamici mediante N4SID
5. Confronto dei dati reali con i dati da simulazione
6. Miglioramento del modello CAE fino a convergenza.

La tesi è organizzata in sei capitoli. Nel capitolo 2 vengono esposti i modelli cinematici dei più comuni robot autonomi su gambe e su ruote nonché le tecniche per la locomozione e i tipi di azionamento. Successivamente vengono esposte le tecniche di localizzazione relative ed assolute, i modelli di interazione veicolo-terreno e per finire i modelli cinematici per i veicoli cingolati. Nel capitolo 3 vengono esposti i principali modelli di macchine agricole: macchine semoventi e trainate. Nel capitolo 4 viene esposta la normale tecnica di modellazione multi-body basata sulla modellazione di corpi

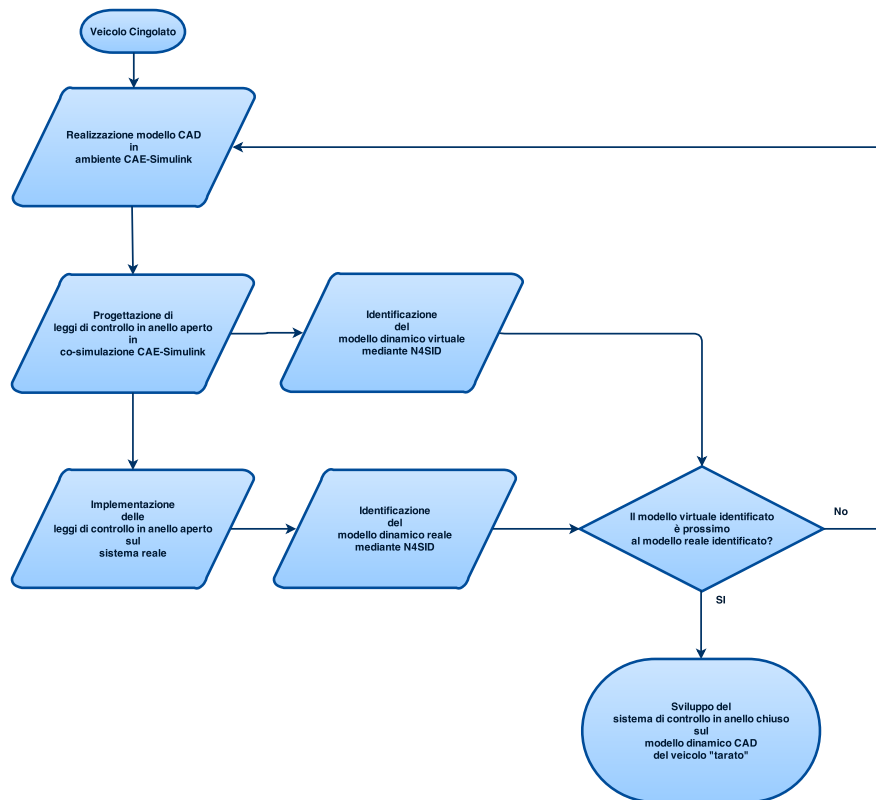


Figura 1.2: Flowchart

rigidi basata sul metodo proposto da Shabana. [18]. Nel capitolo 5, è stato riportato la realizzazione del modello dinamico dell'UTV e lo sviluppo di un sistema di controllo in retroazione.

Capitolo 2

Generalità

La Robotica ha assunto un ruolo sempre più importante nella produzione industriale. I robot manipolatori sono essenziali per i processi di assemblaggio delle linee di produzione. Imbullonato ad altezza spalla in una posizione specifica nella catena di montaggio, il braccio del robot può muoversi con grande velocità e precisione per eseguire compiti ripetitivi come la saldatura a punti e la verniciatura (figura 2.1). Nel settore dell'elettronica, i manipolatori posizionano i componenti da installare sulle schede forate con una precisione sovrumana, rendendo possibile la realizzazione di telefoni cellulari e di computers portatili di dimensioni sempre più ridotte. Eppure, nono-

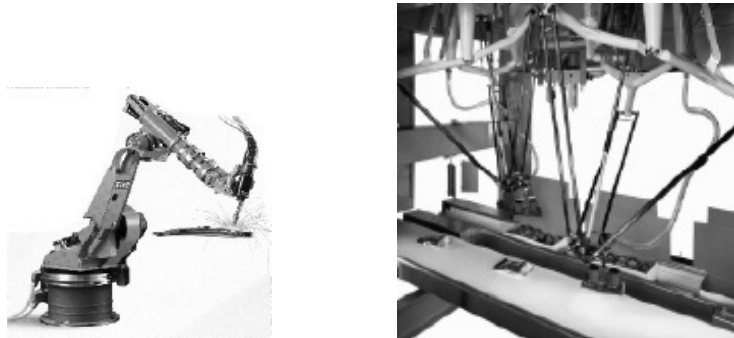


Figura 2.1: Robot manipolatore e robot in linea di montaggio

stante il loro notevole successo, questi robot commerciali soffrono di uno svantaggio fondamentale: la mancanza di mobilità. Un manipolatore fisso ha una gamma limitata di movimenti che dipendono da dove viene serrato. Al contrario, un robot mobile è in grado di muoversi in tutto lo stabilimento

di produzione o più in generale nel suo ambiente di lavoro, in modo flessibile, ovunque ed in maniera più efficace. La problematica principale quindi per un robot mobile è la seguente : come può un robot mobile muoversi in maniera autonoma attraverso gli ambienti del mondo reale per svolgere i suoi compiti? La prima sfida è la locomozione stessa. Come dovrebbe un robot muoversi, e che cosa rende un particolare meccanismo di locomozione superiore a meccanismi alternativi di locomozione ? Ambienti ostili come Marte comportano meccanismi di locomozione anche più insoliti (figura 2.2). In ambienti pericolosi e inospitali, anche sulla Terra, i sistemi teleguidati hanno guadagnato popolarità (figure 2.3, 2.4, 2.5, 2.6) . In questi casi, le complessità di basso livello del robot rendono spesso impossibile per un operatore umano controllare direttamente i suoi movimenti. L'uomo svolge attività di localizzazione e di cognizione, ma si basa sullo schema di controllo del robot per controllare il movimento. Ad esempio, il robot dotato di piedi di Plustech fornisce un coordinamento automatico delle gambe, mentre l'operatore umano sceglie una direzione generale di viaggio (figura 2.3). La figura 2.6 descrive un veicolo subacqueo che controlla sei eliche di stabilizzazione autonomamente per contrastare turbolenze e correnti d'acqua, mentre l'operatore sceglie gli obiettivi di posizione per il sottomarino da raggiungere. Altri robot commerciali condividono lo spazio di lavoro con gli esseri umani (figura 2.7). Questi robot sono utili non per ragioni di mobilità, ma a causa della loro autonomia, e quindi la loro capacità di mantenere un senso di posizione e di navigare senza l'intervento umano, cosa fondamentale. Ad esempio, i robot AGV (Autonomous Guided Vehicle), (Figura 2.8) consegnano in maniera autonoma parti alle varie stazioni di assemblaggio utilizzando speciali guide elettriche mediante l'uso di un sensore. Il robot Helpmate trasporta cibo e medicine in tutto l'ospedale con il tracciamento della posizione delle luci di soffitto, che sono specificate manualmente al robot in anticipo (Figura 2.9). Diverse aziende hanno sviluppato robot autonomi per la pulizia, soprattutto per i grandi edifici (figura 2.10). Uno di questi robot di pulizia è in uso presso la metropolitana di Parigi. Altri robot specializzati nella pulizia di ambienti sfruttano il disegno geometrico regolare di corridoi nei supermercati per facilitare la localizzazione e le attività di navigazione. La progettazione di un robot mobile prevede l'integrazione di molti settori che rendono la robotica mobile un campo interdisciplinare. Per risolvere i problemi di locomozione, la robotica mobile deve comprendere settori quali la meccanica e la cinematica, la dinamica e la teoria del controllo. Per creare robusti sistemi percettivi, la robotica mobile sfrutta l'analisi dei segnali e dispositivi specializzati di conoscenza per impiegare correttamente



Figura 2.2: Il robot mobile Sojourner è stato utilizzato durante la missione Pathfinder per esplorare il pianeta Marte nell'estate 1997. Fu quasi completamente telecomandato dalla Terra. Era tuttavia dotato di alcuni sensori di bordo per il rilevamento di ostacoli. ([http : //ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtm](http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtm))©NASAJPL

una moltitudine di tecnologie. La localizzazione e la navigazione ricadono invece nei settori della teoria dell'informazione, intelligenza artificiale, e teoria della probabilità. Figura 2.13 raffigura uno schema di controllo astratto per i sistemi robotici mobili.



Figura 2.3: Plustech ha sviluppato alcuni dei primi modelli di robot su gambe. Esso è progettato per trasportare legna attraverso la foresta. Il coordinamento delle gambe è automatizzato, ma la navigazione è ancora coordinata dall'operatore umano. (<http://www.plustech.fi>). ©Plustech.



Figura 2.4: Robot per l'ispezione dei condotti di areazione dotato di telecamera con zoom e sensori per la regolazione automatica dell'inclinazione rilevazione del profilo e di intersezioni del condotto(<http://asl.epfl.ch>). ©Sedirep / EPFL.



Figura 2.5: Immagine di Pioneer, un robot progettato per esplorare il sarcofago di Chernobyl. ©Wide World Photos.



Figura 2.6: Immagine del recupero del MBARI ALTEX AUV (Autonomous Underwater Vehicle) sul rompighiaccio Healy a seguito di una immersione sotto il ghiaccio artico. Todd Walsh ©2001 MBARI.



Figura 2.7: Robot guida turistica in grado di interagire e presentare mostre in modo educativo [48, 118, 132, 143,]. Dieci Roboxes hanno operato per cinque mesi alla fiera svizzera EXPO.02, incontrando centinaia di migliaia di visitatori. Essi sono stati sviluppati da EPFL [132] (<http://robotics.epfl.ch>) e commercializzati da BlueBotics (<http://www.bluebotics.ch>).



Figura 2.8: Nuova generazione di veicolo autonomo (AGV) di Swisslog usato per trasportare i blocchi motore da una stazione di montaggio ad un altro. È guidato da un filo elettrico installato nel pavimento. Esistono migliaia di AGV impiegati per il trasporto di prodotti nel settore industriale, magazzini, e persino negli ospedali. ©Swisslog.

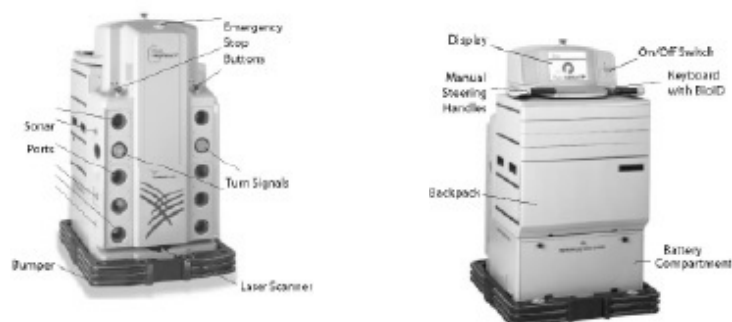


Figura 2.9: HELPMATE è un robot mobile utilizzato negli ospedali per le attività di trasporto. Ha vari sensori di bordo per la navigazione autonoma nei corridoi. Il sensore principale per la localizzazione è una fotocamera guardando al soffitto. È in grado di rilevare le lampade sul soffitto come riferimenti, o luoghi di interesse (<http://www.pyxis.com>). ©Pyxis Corp.



Figura 2.10: BR 700 robot per le pulizie industriali (a sinistra) e il RoboCleaner RC 3000. Il sistema di navigazione del BR 700 è basato su di un sistema sonar molto sofisticato. Il RoboCleaner RC 3000 copre aree molto sporche con una strategia di guida che si conclude quando queste aree vengono pulite definitivamente. Sensori ottici misurano il grado di inquinamento dell'aria aspirata (<http://www.karcher.de>). ©Alfred Kärcher GmbH & Co.

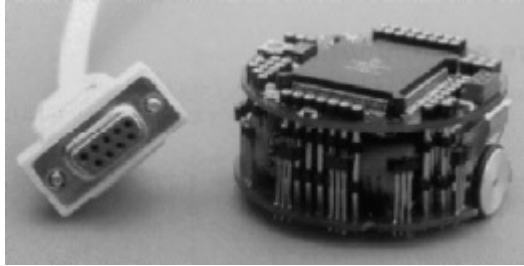


Figura 2.11: KHEPERA è un piccolo robot mobile per la ricerca e l'istruzione. Ha un diametro di circa 60 mm di diametro. Diversi moduli aggiuntivi come telecamere e pinze sono disponibili. KHEPERA è realizzato e distribuito da K-Team SA, Svizzera (<http://www.k-team.com>). ©K-Team SA.

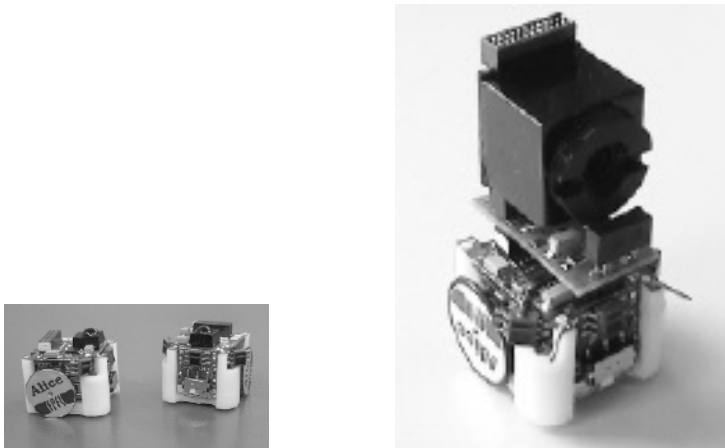


Figura 2.12: Alice è uno dei robot completamente autonomi più piccoli. Si tratta di circa 2 x 2 x 2 cm, ha una autonomia di circa 8 ore e utilizza sensori a infrarossi a distanza, baffi tattili, o anche una piccola telecamera per la navigazione [54].

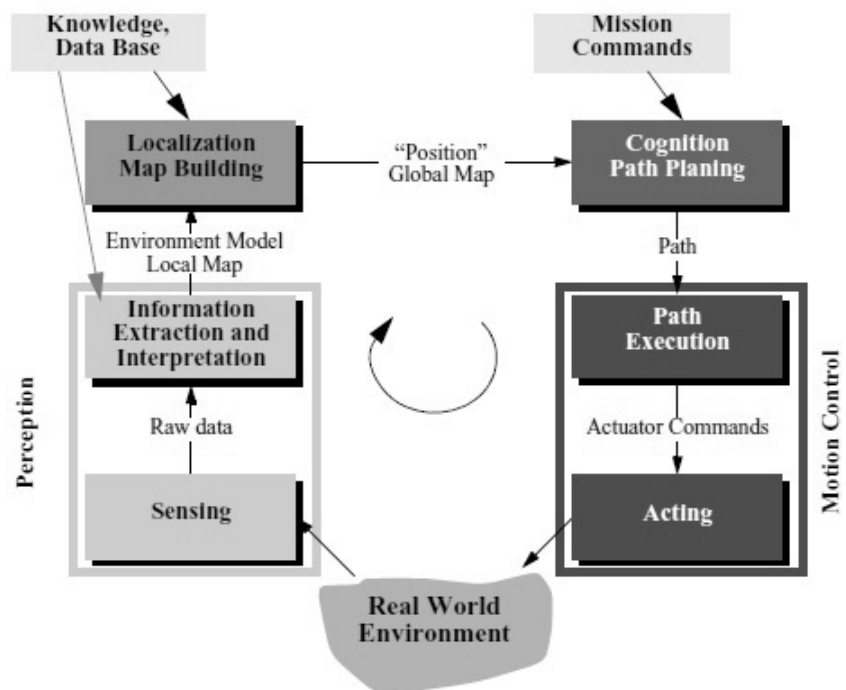


Figura 2.13: Schema di controllo di riferimento per i sistemi di robot mobili usati in questo lavoro.

2.1 Locomozione

Un robot mobile ha bisogno di meccanismi di locomozione per di muoversi nel suo ambiente. Ci sono una grande varietà di possibili modi di muoversi, e la selezione della tipologia di locomozione costituisce un aspetto importante nella progettazione di un robot mobile. Creati in laboratorio, ci sono molti robot di ricerca che possono camminare, saltare, correre, scivolare, pattinare, nuotare, volare, e, naturalmente, rotolare [27]. La maggior parte di questi meccanismi di locomozione sono stati ispirati dalla biologia (vedi figura 2.14). Vi è, tuttavia, un'eccezione: la ruota è un'invenzione umana con elevata efficienza su terreni pianeggianti. Questo meccanismo non è completamente estraneo ai sistemi biologici. Il nostro sistema bipede di camminata può essere approssimato ad un poligono avente lati uguali in lunghezza alla campata del passo (figura 2.15). Come la dimensione del passo diminuisce, il poligono tende ad un cerchio o ruota. Ma la natura non ha sviluppato completamente un giunto rotante, attivamente alimentato, che è la tecnologia necessaria per la locomozione a ruote. Le soluzioni proposte dai sistemi biologici funzionano per una grande varietà di ambienti. Sarebbe preferibile, quindi, copiare la selezione di meccanismi di locomozione offerta dalla biologia. Tuttavia, replicare la natura a questo proposito è estremamente difficile per diversi motivi. Per cominciare, la complessità meccanica è realizzata facilmente in sistemi biologici attraverso la replica strutturale. La divisione cellulare, in combinazione con la specializzazione, può facilmente produrre un millepiedi con diverse centinaia di gambe e diverse decine di migliaia di ciglia indipendenti. In strutture artificiali, ciascuna parte deve essere fabbricata individualmente, e quindi non è possibile alcuna economia di scala. Inoltre, la cella è un elemento microscopico che consente un'estrema miniaturizzazione. Date l'ordine di grandezza di dimensioni e di peso, gli insetti raggiungono un livello di robustezza che ancora non si è riuscito a replicare impiegando tecniche di fabbricazione umana. Infine, i sistemi di attivazione muscolare utilizzati da grandi animali e dagli insetti, i sistemi di accumulo di energia, tempo di risposta, e di efficienza superano di gran lunga analoghi sistemi artificiali. A causa di queste limitazioni, i robot mobili in genere utilizzano ruote, tecnologia umana ben nota per i veicoli, o utilizzano un piccolo numero di gambe articolate, il più semplice degli approcci biologici alla locomozione (vedi figura 2.15). In generale, la locomozione tramite gambe richiede un numero maggiore di gradi di libertà e quindi una maggiore complessità meccanica rispetto alla locomozione a ruote. Ruote, che oltre ad essere semplici, sono estremamente adatte alla terra piatta. Come

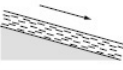


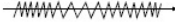








Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Figura 2.14: Sistemi di locomozione usati in sistemi biologici.

la figura 2.16 riporta, su superfici piane la locomozione a ruote è di 1-2 ordini di grandezza, risulta più efficiente della locomozione tramite gambe. La ferrovia è progettata per la locomozione a ruote, perchè l'attrito di rotolamento è ridotto al minimo tra le superfici di acciaio duro e piatto. Ma, come le superfici diventano morbide, la locomozione a ruote accumula inefficienze dovute all'attrito volvente, mentre la locomozione su gambe soffre molto meno perchè consiste soltanto in contatti puntuali con il terreno. Questo è dimostrato in figura 2.16 dalla drammatica perdita di efficienza nel caso di un pneumatico su terreno morbido. In effetti, l'efficienza della locomozione a ruote dipende molto dalle qualità ambientali, particolarmente la planarità e durezza del terreno, mentre l'efficienza di gambe per la locomozione dipende dalla massa della gamba e massa del veicolo, che il robot deve supportare in vari punti con per una andatura a gambe. Si comprende quindi che la natura favorisce la locomozione a zampe, poichè la locomozione di sistemi in natura deve operare su terreni accidentati e non strutturati. Ad esempio, nel caso di insetti la variazione verticale dell'altezza del terreno è spesso un ordine di grandezza maggiore rispetto all'altezza totale dell'insetto. Per lo stesso motivo, l'ambiente umano di frequente è costituito da superfici lisce, sia all'interno che all'esterno. Pertanto, è anche comprensibile che quasi tutte le applicazioni industriali della robotica mobile utilizzano qualche forma

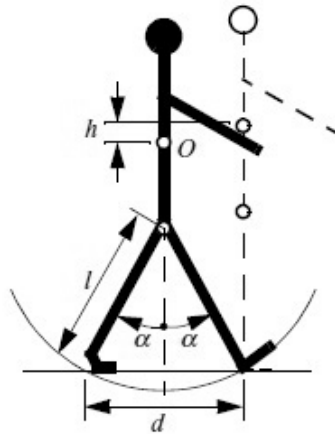


Figura 2.15: La camminata di un bipede può essere approssimata da un poligono che rotola, avente lati uguali in lunghezza d alla campata del passo. Come la dimensione del passo diminuisce, il poligono si avvicina ad un cerchio o ruota avente raggio l .

di locomozione a ruote. Recentemente, per ambienti esterni più naturali, ci sono stati alcuni progressi verso robot industriali ibridi come il robot per la silvicoltura mostrato in figura 2.17. La locomozione è il complemento dei manipolatori. Nei manipolatori, il braccio del robot è fisso ma sposta gli oggetti nello spazio di lavoro impartendo forza a loro. Nella locomozione, l'ambiente è fisso e il robot si muove impartendo forza all'ambiente. In entrambi i casi, la base scientifica è lo studio di attuatori che generino forze di interazione, e di meccanismi che implementano le proprietà cinematiche e dinamiche desiderate. Locomozione e manipolazione quindi condividono gli stessi problemi fondamentali di stabilità, caratteristiche di contatto, e il tipo di ambiente:

- stabilità
 - numero e geometria dei punti di contatto
 - centro di gravità
 - stabilità dinamica e statica
 - inclinazione del terreno
- caratteristiche del contatto

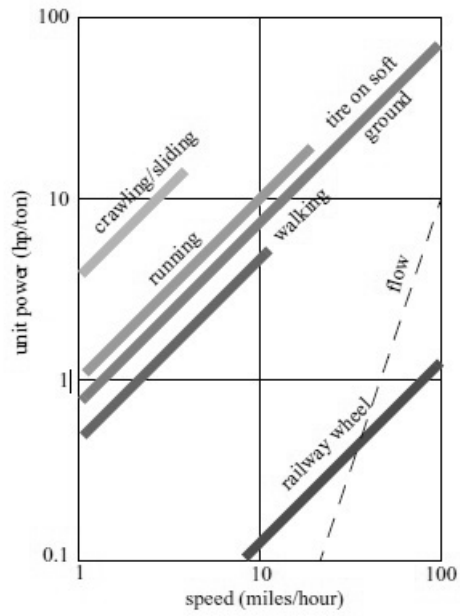


Figura 2.16: Potenza specifica in funzione della velocità raggiungibile da vari meccanismi di locomozione [33].

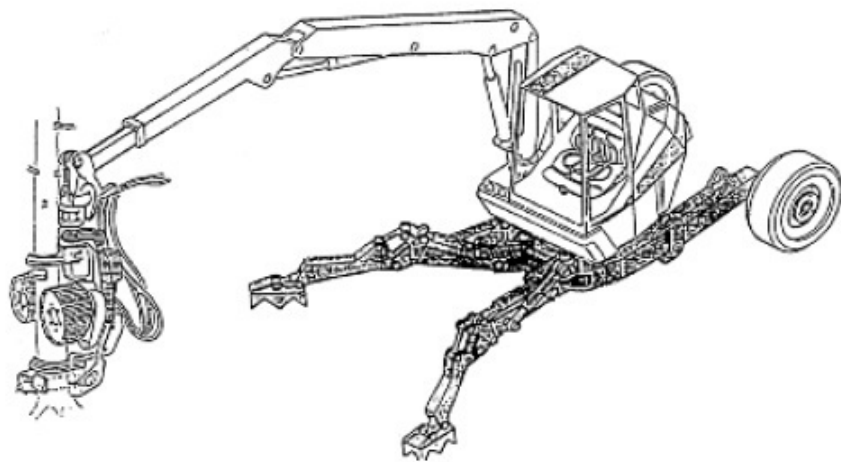


Figura 2.17: RoboTrac, veicolo ibrido ruota-zampa per terreni misti [130].

- punto/superficie di contatto, dimensione e forma
- angolo di contatto
- attrito

- tipologia di ambiente
 - struttura
 - mezzo, (acqua, aria, terreno morbido o duro)

Un'analisi teorica per la locomozione inizia dalla meccanica e dalla fisica. Partendo da questo punto, siamo in grado di definire e analizzare tutti i tipi di sistemi di locomozione di robot mobili.

2.1.1 Robot mobili su gambe

Locomozione su gambe è caratterizzata da una serie di contatti puntuali tra il robot e la terra. I vantaggi chiave includono l'adattabilità e la manovrabilità su terreni accidentati. Poiché è necessaria solo una serie di contatti puntuali, la qualità della terra non importa fintanto che il robot possa mantenere un'adeguata distanza da terra. Inoltre, un robot su gambe è in grado di attraversare un foro o abisso finché la portata delle sue gambe supera la larghezza del foro. Un ultimo vantaggio della locomozione su gambe è la possibilità di manipolare oggetti nell'ambiente con grande abilità. Un eccellente esempio è rappresentato da un insetto, lo scarabeo stercorario, che è in grado di far rotolare una palla, per mezzo delle sue abili zampe anteriori. I principali svantaggi della locomozione su gambe includono la potenza e la complessità meccanica. La gamba, che può includere diversi gradi di libertà, deve essere in grado di sostenere parte del peso totale del robot, e in molti robot deve essere in grado di sollevare e abbassare il robot. Inoltre, l'elevata manovrabilità si potrà ottenere soltanto se le gambe hanno un numero sufficiente di gradi di libertà per impartire forze in diverse direzioni. Poiché i robot su gambe sono biologicamente ispiranti, è istruttivo esaminare la disposizione delle zampe negli essere viventi. Grandi animali, come i mammiferi ed i rettili, hanno quattro zampe, gli insetti hanno sei o più gambe. In alcuni mammiferi, la capacità di camminare su due gambe è stato perfezionato dall'evoluzione. Soprattutto nel caso degli esseri umani, l'equilibrio è progredito al punto che possiamo anche saltare su di una sola gamba. Questa eccezionale manovrabilità ha un prezzo: il sistema di controllo attivo necessita di maggiore energia per mantenere l'equilibrio. Al

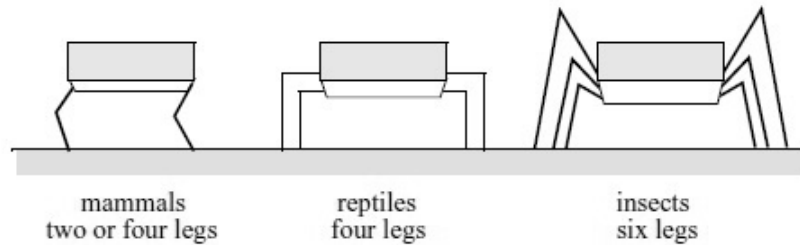


Figura 2.18: Disposizione delle gambe per vari animali.

contrario, una creatura con tre gambe può esibire una posa statica, stabile purché si possa garantire che il suo centro di gravità sia all'interno del treppiede di contatto con il terreno. Ma un robot deve essere in grado di sollevare le gambe per camminare. Per conseguire un avanzamento statico, un robot deve avere almeno sei gambe. In tale configurazione, è possibile progettare un avanzamento in cui un treppiede staticamente stabile è in contatto con il terreno in ogni momento (figure 2.21). Insetti e ragni sono subito in grado di camminare quando nascono. Per loro, il problema dell'equilibrio durante la deambulazione è relativamente semplice. Mammiferi, con quattro gambe, non possono realizzare un avanzamento statico, ma sono in grado di stare comodamente su quattro gambe. Vi è anche la possibilità di una grande

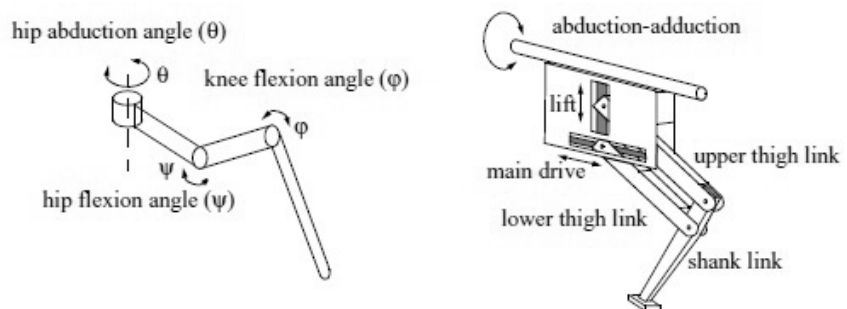


Figura 2.19: Due esempi di gambe con tre gradi di libertà.

varietà nella complessità di ogni singola gamba. Ancora una volta, il mondo

biologico fornisce numerosi esempi agli antipodi. Per esempio, nel caso del bruco, ogni gamba viene estesa usando la pressione idraulica restringendo la cavità corporea e forzando un aumento della pressione, e ciascuna gamba viene retratta longitudinalmente rilassando la pressione idraulica, attivando un singolo muscolo di trazione che tira la gamba verso il corpo. Ogni gamba ha un solo grado di libertà, che è orientato longitudinalmente lungo la gamba. La locomozione in avanti dipende dalla pressione idraulica nel corpo, che aumenta la distanza tra coppie di gambe. La gamba di un bruco è quindi meccanicamente molto semplice, con un numero minimo di muscoli consente di conseguire una complessa locomozione. All'altro estremo, la gamba umana ha più di sette gradi di libertà, in combinazione con una ulteriore attuazione delle dita dei piedi. Più di quindici gruppi muscolari azionano otto articolazioni complesse. Nel caso di robot mobili su gambe, un minimo di due gradi di libertà è generalmente richiesto per spostare una gamba avanti sollevando la gamba e oscillandola in avanti. Più comune è l'aggiunta di un terzo grado di libertà per manovre più complesse, con gambe come quelle mostrate in figura 2.19. Recenti successi nella creazione di robot bipedi si sono ottenuti aggiungendo un quarto grado di libertà alla caviglia. La caviglia permette un contatto più coerente con la terra azionando la posa della pianta del piede. In generale, l'aggiunta di gradi di libertà per una gamba di robot aumenta la manovrabilità del robot, sia aumentando la gamma di terreni su cui può passare che la capacità del robot di viaggiare con una varietà di andature. Gli svantaggi principali di giunti e attuatori aggiuntivi riguardano naturalmente l'energia richiesta, il controllo e la massa. Attuatori aggiuntivi richiedono energia e controllo, ed inoltre aggiungono massa alla gamba, aumentando ulteriormente i requisiti di alimentazione e di carico su attuatori esistenti. Nel caso di un robot mobile millepiedi, vi è il problema di coordinamento delle gambe per la locomozione, e il controllo della deambulazione. Il numero di possibili andature dipende dal numero di gambe. L'andatura è una sequenza di sollevamento e di abbassamento delle singole gambe. Per un robot mobile con k gambe, il numero totale di possibili eventi N per un robot su gambe è:

$$N = (2k - 1)! \quad (2.1)$$

Per un bipede camminatore $k = 2$ gambe, il numero di possibili eventi N è:

$$N = (2k - 1)! = 3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6 \quad (2.2)$$

I sei diversi eventi sono:

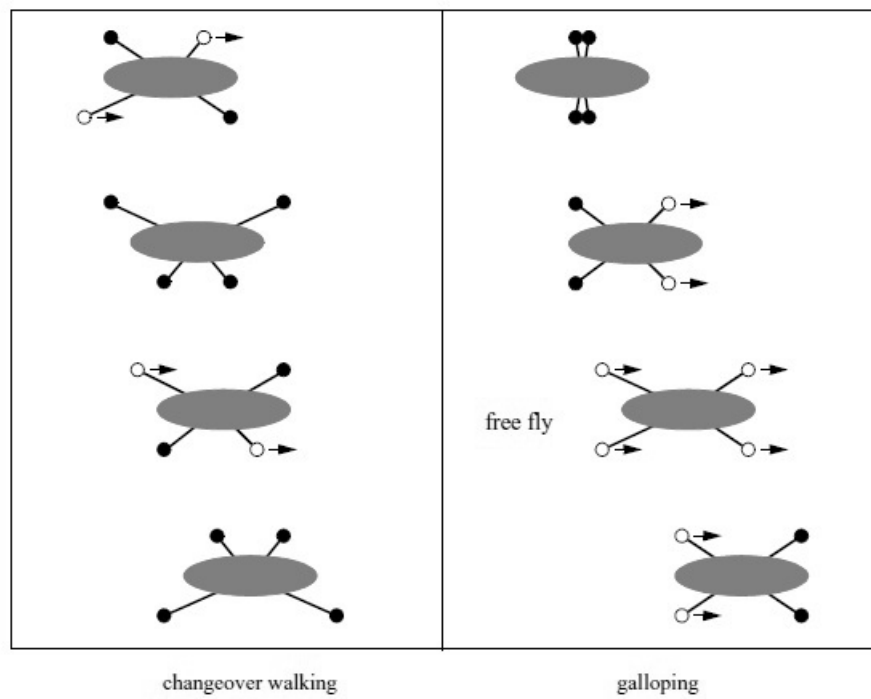


Figura 2.20: Due andature con quattro gambe. Poichè questo robot ha meno di sei gambe, l'avanzamento statico non è generalmente possibile.

1. sollevare la gamba destra;
2. sollevare la gamba sinistra;
3. rilasciare la gamba destra;
4. rilasciare la gamba sinistra;
5. sollevare entrambe le gambe assieme;
6. rilasciare entrambe le gambe assieme.

Naturalmente, questo valore cresce rapidamente per numero di gambe elevato. Ad esempio, un robot a sei gambe ha molte più andature:

$$N = 11! = 39916800 \quad (2.3)$$

Le figure 2.20 e 2.21 rappresentano diverse andature a quattro gambe e l'andatura a sei zampe del treppiede. Sebbene non vi siano applicazioni industriali fino ad oggi, la locomozione su gambe costituisce un importante settore di ricerca a lungo termine. Diversi progetti interessanti sono stati presentati di seguito, partendo dal robot con una gamba sola fino ad arrivare a robot a sei gambe.

2.1.1.1 Robot ad una gamba

Il numero minimo di gambe è, naturalmente, uno. Minimizzare il numero di gambe è utile per diversi motivi. Per la massa corporea è particolarmente importante per le macchine che camminano, e la sola gamba minimizza massa gamba cumulativa. Coordinamento della gamba è richiesto quando un robot ha diverse gambe, ma con una gamba è necessario tale coordinamento. Forse più importante, il robot con una gamba sola massimizza il vantaggio fondamentale di locomozione su gambe: le gambe costituiscono punti di contatto con il terreno rispetto ad un cingolo, o a ruote. Un robot a singola gamba richiede solo una sequenza di singoli contatti, rendendolo sensibile ai terreni più difficili. Inoltre, un robot saltellando può superare dinamicamente uno ostacolo più grande rispetto al suo passo prendendo la rincorsa, mentre un robot millepiedi che non può correre è limitato dalla sua portata. La sfida principale nella creazione di un robot a gamba unica è l'equilibrio. Per un robot con una gamba sola, una postura statica non solo è impossibile, ma anche la stabilità statica è impossibile. Il robot si deve bilanciare attivamente o cambiando il suo centro di gravità o per imprimere

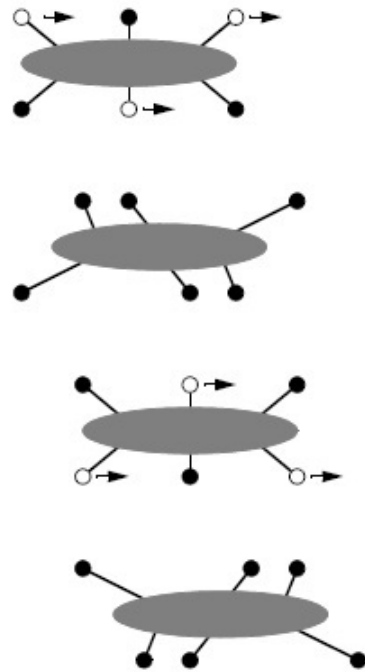


Figura 2.21: Avanzamento statico in presenza di sei gambe.

forze correttive. Figura 2.22 mostra il robot di Raibert, uno dei più noti robot a singola gamba realizzati. Questo robot effettua continue correzioni sul posizionamento del corpo ed sulla velocità del robot regolando l'angolo della gamba rispetto al corpo stesso. L'azionamento è idraulico, richiede una pompa idraulica esterna da collegare al robot.

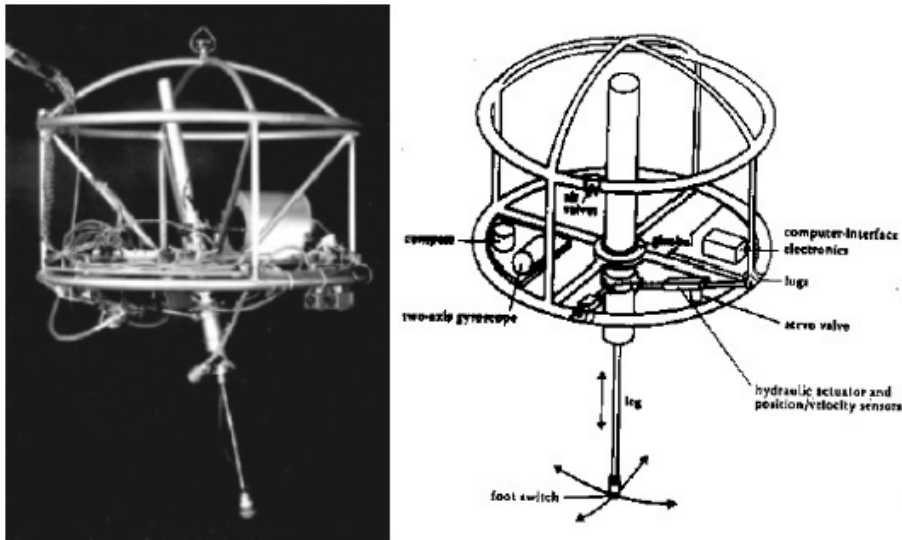


Figura 2.22: Il robot ad una gamba di Raibert.

2.1.1.2 Robot a due gambe (bipede)



Specifiche:

Peso:	7 kg
altezza:	58 cm
Collo DOF:	4
Braccio DOF:	2 x 5
Gamba DOF:	2 x 6
Cinque dita per mano	

Una varietà di robot bipedi di successo sono stati realizzati nel corso degli ultimi anni. Robot su due gambe hanno dimostrato di poter correre, saltare, salire e discendere le scale, e anche fare evoluzioni aeree come capriole. Nel settore commerciale, sia Honda che Sony hanno compiuto progressi significativi che hanno permesso ai robot bipedi di essere capaci di effettuare tali movimenti. Entrambe le società hanno creato piccole articolazioni motorizzate che consentono di raggiungere prestazioni di peso-potenza inaudite per i servomotori disponibili in commercio. Questi nuovi servi intelligenti consentono di attuare in maniera opportuna mediante il rilevamento della coppia mediante un controllo ad anello chiuso. Figura 2.23 mostra il mo-



Specifiche:

Peso:	7 k
Altezza:	58
Collo DOF:	4
Braccio DOF:	2 x
Gambe DOF:	2 x
Cinque dita per mano	

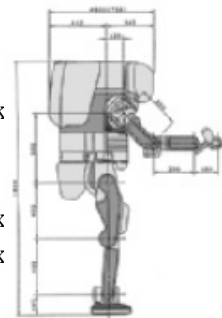
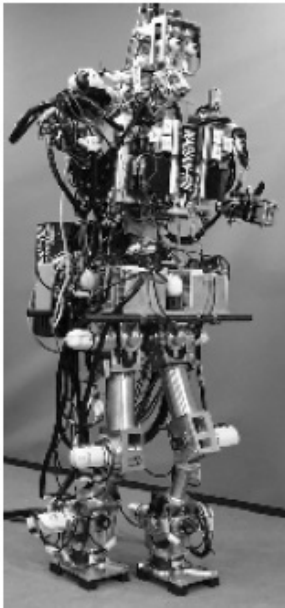


Figura 2.23: Il robot umanoide P2 della Honda.

dello P2. Questi robot umanoidi della Honda sono stati progettati non per scopi di intrattenimento, ma come sistemi di ausilio per gli essere umani.

Per Honda, ad esempio, l'altezza di un robot umanoide deve essere almeno uguale all'altezza minima che consente di gestire il controllo di interruttori della luce. Una caratteristica importante dei robot bipedi è la loro forma



Specifiche:

Peso:	131 kg
Altezza:	1.88 m
DOF in totale:	43
Arti inferiori:	2 x 6
Tronchi:	3
Braccia:	2 x 10
Collo	4
Occhi:	2 x 2

Figura 2.24: Il robot umanoide WABIAN-RIII della Università di Waseda in Giappone.

antropomorfa. Possono essere costruiti per avere le stesse dimensioni approssimative degli esseri umani, e questo li rende veicoli eccellenti per la ricerca della interazione uomo-robot. WABIAN è un robot costruito presso l'università di Waseda in Giappone (figura 2.24) solo per fini di ricerca. WABIAN è stato progettato per emulare il movimento umano, ed è anche progettato per ballare come un essere umano. I robot bipedi possono essere staticamente stabili entro certi limiti, e così i robot come P2 e WABIAN generalmente devono eseguire correzioni di bilanciamento in maniera continua anche quando sono fermi. Inoltre, ogni gamba deve essere capace di sostenere il peso del robot. Nel caso di robot a quattro gambe, la soluzione del problema è facilitato per quanto riguarda i requisiti di carico che di equilibrio. Un elegante robot bipede è lo Spring Flamingo del MIT (figura 2.25). Questo robot è costituito da molle in serie con gli attuatori delle gambe per

ottenere un passo più elastico . Combinato con rotule che limitano gli angoli articolari del ginocchio, il Flamingo raggiunge movimenti sorprendenti.

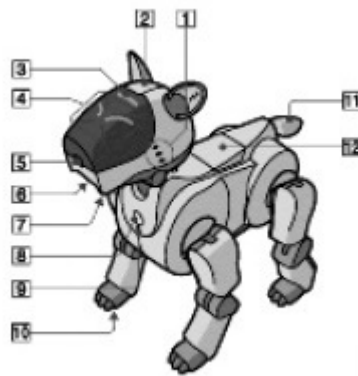


Figura 2.25: Il robot Spring Flamingo sviluppato dal MIT

2.1.1.3 Robot a quattro gambe (quadrupedi)

Un robot su quattro gambe è passivamente stabile, il movimento invece rimane difficile perché per rimanere stabile il centro di gravità del robot deve essere spostato attivamente durante la deambulazione. Sony ha recentemente investito diversi milioni di dollari per sviluppare un robot a quattro zampe chiamato AIBO (figura 2.1.1.3). Per creare questo robot, Sony prodotto sia un nuovo sistema operativo che è quasi in tempo reale e nuovi servomotori a cremagliera che erogano una coppia sufficientemente elevata per sostenere il robot. Oltre a sviluppare motori personalizzati e software, Sony ha incorporato un sistema di visione a colori che permette ad AIBO di inseguire una palla colorata. Il robot è in grado di funzionare per un massimo di un'ora prima di necessitare di una ricarica. Le prime vendite del robot sono state molto forti, con oltre 60.000 unità vendute nel primo anno. Tuttavia, il numero di motori e l'investimento tecnologico alla base di questo cane robot hanno determinato un prezzo molto alto sui \$ 1500. Gli esseri umani possono trattare il robot di Sony, per esempio, come un

animale domestico e potrebbe sviluppare un rapporto emotivo analogo a quello tra uomo e cane. Inoltre, Sony ha progettato il modo di camminare di AIBO e il comportamento generale in modo da emulare l'apprendimento e la maturazione, con conseguente comportamento dinamico nel tempo, che può essere interessante per il proprietario la possibilità di monitorare come il comportamento cambia nel tempo.

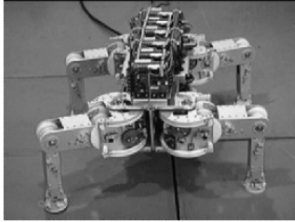


ERS-110 © 1999 Sony Corporation



ERS-210 © 2000 Sony Corporation

1. Microfono Stereo : consente ad AIBO di captare i suoni circostanti.
2. Sensore tattile : Riconosce quando una persona tocca AIBO sulla testa.
3. Indicatore : Visualizza la modalità di funzionamento del AIBO.
4. Luci degli occhi: Si illuminano di blu-verde o rosso per indicare lo stato emotivo di AIBO.
5. Telecamera a colori: consente ad AIBO di cercare oggetti e li riconosce per colore e movimento.
6. Speaker: Emette vari toni musicali ed effetti sonori.
7. Sensore sul mento: rileva quando una persona tocca AIBO sul mento.
8. Pausa: Premere per attivare AIBO o per mettere in pausa AIBO.
9. Luce sul Petto: Fornisce informazioni sullo stato del robot.
10. Sensori sui cuscinetti delle zampe: Situato sulla parte inferiore di ogni zampa.
11. Fanale posteriore: Di colore blu o arancione per mostrare lo stato emotivo di AIBO.
12. Sensore posteriore: Riconosce quando una persona tocca AIBO sul retro.



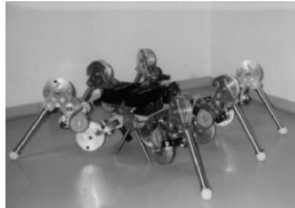
Specifications:

Weight:	9 kg
Height:	0.25 m
DOF:	4 x 3

Figura 2.26: Titan VIII, robot a quattro gambe sviluppato dalla Tokyo Institute of Technology.

2.1.1.4 Robot a sei gambe (hexapod)

Le configurazioni a sei zampe sono stati estremamente popolari in robotica mobile a causa della loro stabilità statica durante la deambulazione, riducendo la complessità del controllo (figure 2.27 e 2.28). Nella maggior parte dei casi, ogni gamba ha tre gradi di libertà, tra cui la flessione dell'anca, la flessione del ginocchio e del suo adduttore (vedi figura 2.19). Genghis è un robot disponibile in commercio che ha sei zampe, ognuna delle quali ha due gradi di libertà governati da semplici servi da modellismo (figura 2.28). Tale robot, che possiede solo la flessione dell'anca e dell'adduttore, possiede meno manovrabilità sui terreni accidentati, ma possiede una buona manovrabilità su terreni pianeggianti. Gli insetti, che sono senza dubbio le creature dalla locomozione di maggior successo sulla terra, eccellono su tutte le forme di terreno avendo sei gambe, anche a testa in giù. Attualmente, il divario tra le capacità degli insetti a sei zampe ed i robot artificiali a sei zampe è ancora abbastanza grande. Lo sviluppo di robot a sei gambe è abbastanza recente. Ad esempio, un gruppo di ricerca sta tentando di ricreare la funzione meccanica completa della gamba scarafaggio. E' chiaro dagli esempi precedenti che i robot a sei gambe hanno bisogno ancora di effettuare molti progressi prima che possano essere ritenuti competitivi con i loro equivalenti biologici. Tuttavia, progressi significativi sono stati realizzati di recente, grazie principalmente ai progressi nella progettazione degli attuatori. Ancora non è possibile la creazione di sistemi di attuazione che si avvicinano in maniera efficiente ai muscoli degli animali non è ancora possibile soprattutto per quanto riguarda lo stoccaggio della energia necessaria per il funzionamento degli attuatori.



Specifiche:

Velocità max:	0.5 m/s
Peso:	6 kg
Altezza:	0.3 m
Lunghezza:	0.7 m
No. di gambe:	6
DOF in totale:	6 x 3
Consumo energetico:	10 W

Figura 2.27: Lauron II, robot a sei gambe sviluppato dalla università di Karlsruhe, Germania.

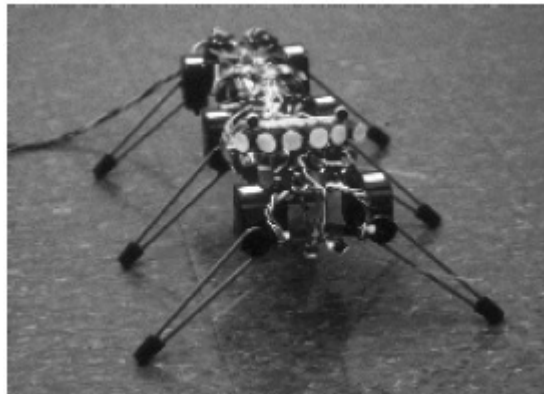


Figura 2.28: Genghis, uno dei robot più famosi del MIT.

2.1.2 Robot Mobili su Ruote

La ruota è il più importante meccanismo di locomozione per la robotica mobile e più in generale per i veicoli. I rendimenti ottenuti sono elevati, come dimostrato in figura 2.16, inoltre, l'equilibrio non è solitamente un problema nella progettazione di robot su ruote, visto che sono quasi sempre progettati in modo tale che tutte le ruote siano in contatto con il terreno. Per cui, tre ruote sono sufficienti a garantire equilibrio stabile, anche se, come vedremo in seguito, robot a due ruote possono essere anch'essi stabili. Quando vengono utilizzate più di tre ruote, un sistema di sospensione è necessario per consentire a tutte le ruote di mantenere contatto con il terreno, in presenza di terreno irregolare. Invece di preoccuparsi di equilibrio, la ricerca sui robot mobili su ruote tende a concentrarsi sui problemi di trazione e di stabilità, manovrabilità e controllo: le ruote possono fornire trazione e stabilità sufficiente a coprire tutte le tipologie di terreno desiderato, e questa configurazione delle ruote del robot permette un sufficiente controllo sulla velocità del robot. Come vedremo, vi è un gran numero di possibili configurazioni

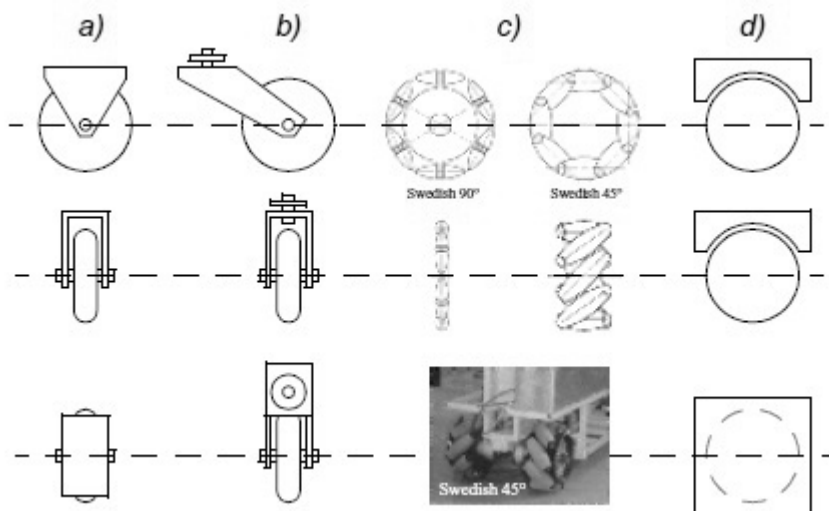


Figura 2.29: Le quattro tipologie base di ruote. (a) ruota standard: due gradi di libertà, rotazione attorno (motorizzato) all'asse della ruota e il punto di contatto (b) ruota basculante: due gradi di libertà, rotazione attorno a un giunto dello sterzo sfasato (c) ruota swedish: tre gradi di libertà, rotazione attorno all'asse (motorizzato) della ruota, intorno ai rulli, e intorno al punto di contatto. (d) sfera o ruota sferica: realizzazione tecnicamente difficile.

per le ruote quando si considerano le possibili tecniche di locomozione per robot mobili. Iniziamo discutendo della ruota in dettaglio, in quanto vi sono una serie di tipologie diverse di ruote, con punti di forza e di debolezza specifici. Quindi, esaminiamo configurazioni complete di ruote che offrono forme articolari di locomozione per un robot mobile.

2.1.2.1 Design delle ruote

Ci sono quattro classi principali di ruota, come mostrato in figura 2.29. Esse sono molto diverse nella loro cinematica, e quindi la scelta del tipo di ruota ha un grande effetto sulla cinematica globale del robot mobile. La ruota normale e la ruota basculante hanno un asse principale di rotazione e sono quindi altamente direzionali. Per muoversi in una direzione diversa, la ruota deve essere ruotata prima attorno ad un asse verticale. La differenza fondamentale tra queste due ruote è che la ruota standard può realizzare questo movimento senza effetti collaterali, visto che il centro di rotazione passa attraverso la zona di contatto con il terreno, mentre la ruota basculante ruota attorno ad un asse sfasato, provocando una forza che deve essere impartita al telaio del robot durante la sterzata. La ruota swedish e la ruota




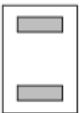
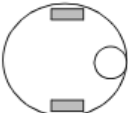




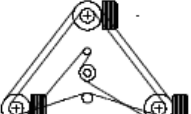
Figura 2.30: Navlab I, il primo veicolo autostradale autonomo che controlla la direzione e l'acceleratore tramite telecamere e sensori radar[61]. Sviluppato da CMU.

sferica sono entrambe meno vincolate dalla direzionalità rispetto alle ruote di serie convenzionale. La funzionalità di una ruota swedish è simile a quella di una ruota normale, ma fornisce una bassa resistenza in altre direzioni, spesso perpendicolari alla direzione convenzionale, come nel swedish 90° , e talvolta ad un angolo intermedio, come nel swedish 45° . I piccoli rulli attaccati attorno alla circonferenza della ruota sono passivi e l'asse primario della ruota è l'unico giunto alimentato attivamente. Il vantaggio principale di questo tipo di ruota è che, sebbene la rotazione della ruota sia alimentata solo lungo un asse principale, la ruota può muoversi cinematicamente con poco attrito lungo molte possibili traiettorie, non solo in avanti e all'indietro. La ruota sferica è una ruota veramente omnidirezionale, spesso progettata in modo che possa essere alimentata attivamente per muoversi lungo qualsiasi direzione. Un meccanismo per l'attuazione della ruota sferica è simile al meccanismo del mouse del computer, fornendo rulli motorizzati che strusciano contro la superficie superiore della sfera e impongono la forza di rotazione. Indipendentemente dall'uso che si fa della ruota, nei robot progettati per ambienti all-terrain e nei robot con più di tre ruote, un sistema di sospensione è normalmente necessario per mantenere il contatto della ruota con il terreno. Uno degli approcci più semplici per la realizzazione di sospensioni è quello di progettare ruote flessibili. Ad esempio, nel caso di alcuni robot a quattro ruote basculanti, i produttori hanno applicato pneumatici di gomma morbida deformabile per creare una sospensione primitiva. Naturalmente, questa soluzione limitata non può competere con un sofisticato sistema di sospensioni in applicazioni dove il robot deve avere sospensioni dinamiche per terreni significativamente non piatti. La scelta del tipo di ruote per un robot mobile è fortemente legato alla scelta delle ruote a disposizione, o della geometria delle ruote. Il progettista del robot mobile deve considerare questi due problemi contemporaneamente nella progettazione del meccanismo di locomozione di un robot a ruote. Perché è importante il tipo di ruota e la sua geometria? Tre caratteristiche fondamentali di un robot sono regolate da queste scelte: manovrabilità, controllabilità e la stabilità. A differenza delle automobili, che sono in gran parte progettati per un ambiente altamente standardizzato (la rete stradale), i robot mobili sono progettati per applicazioni su un'ampia varietà di situazioni. Le vetture condividono tutte simili configurazioni delle ruote perché vi è una regione nello spazio di design che massimizza la manovrabilità, controllabilità e stabilità per il loro ambiente: la carreggiata asfaltata. Tuttavia, non vi è alcuna singola configurazione di ruote che massimizza queste qualità per la varietà di ambienti affrontati dai diversi robot mobili. Per cui vi è una grande varietà nelle

configurazioni delle ruote dei robot mobili. Infatti, pochi robot utilizzano la configurazione di ruote alla Ackerman dell'automobili a causa della scarsa manovrabilità, con l'eccezione di robot mobili progettati per il sistema stradale (figura 2.30). La tabella 2.1 fornisce una panoramica delle configurazioni di ruote ordinati per il numero di ruote. Questa tabella mostra sia la selezione di particolari tipi di ruote e loro configurazione geometrica sul telaio del robot. Si noti che alcune delle configurazioni mostrate sono di scarsa utilità in applicazioni di robot mobili. Ad esempio, la disposizione a bicicletta a due ruote ha manovrabilità moderata e minima controllabilità. Come una macchina a singola zampa, non può mai stare ferma. Tuttavia, questa tabella fornisce un'indicazione della grande varietà di configurazioni di ruote possibili nella progettazione di robot mobili. Il numero di variazioni nella tabella 2.1 è piuttosto grande. Tuttavia, ci sono importanti tendenze e raggruppamenti che possono aiutare nel comprendere i vantaggi e gli svantaggi di ogni configurazione. Qui di seguito, identifichiamo alcune delle principali parole chiavi in termini dei tre problemi che abbiamo identificato in precedenza: la stabilità, la manovrabilità e la controllabilità.

2.1.2.2 Stabilità

Sorprendentemente, il numero minimo di ruote richieste per la stabilità statica è due. Come mostrato precedentemente, un robot a due ruote motrici con differenziale può raggiungere la stabilità statica se il centro di massa è sotto l'asse delle ruote. *Cyc* è un robot mobile commerciale che utilizza questa configurazione ruote (figura 2.31). Tuttavia, in circostanze ordinarie una soluzione del genere richiede grandi diametri delle ruote. La dinamica può anche causare ad un robot a due ruote di colpire il pavimento con un terzo punto di contatto, per esempio, nel caso di coppie sufficientemente elevate del motore da fermo. Convenzionalmente, la stabilità statica richiede un minimo di tre ruote, con l'avvertenza supplementare che il centro di gravità deve essere contenuta all'interno del triangolo formato dai punti di contatto col suolo delle ruote. La stabilità può essere ulteriormente migliorata aggiungendo più ruote, anche se una volta che il numero di punti di contatto supera tre, la natura iperstatica della geometria richiederà qualche forma di sospensione flessibile per i terreni irregolari. In generale, l'altezza da terra di robot con le ruote swedish e sferiche è piuttosto limitata a causa dei vincoli meccanici della costruzione di ruote omnidirezionali. Una soluzione interessante del problema della navigazione omnidirezionale è la configurazione a quattro ruote basculanti in cui ciascuna ruota è governata attivamente. In

# di ruote	Disposizione	Descrizione	Esempi tipici
2		Ruota sterzante anteriore, ruota motorizzata posteriore	Bicicletta, motociclo
		Ruote differenziali motorizzate con centro di massa posto al di sotto dell'asse	Cye personal robot
3		Ruote differenziali motorizzate con terzo punto di contatto	Nomad Scout, smartRob EPFL
		Due ruote motrici indipendenti Una ruota omnidirezionale libera	Robot domestici, inclusi gli EPFL robots Pygmalion e Alice
		Due ruote motrici collegate Una ruota sterzante libera	Ape Piaggio
		Due ruote libere posteriore Una ruota motrice sterzante	Neptune (Carnegie Mellon University), Hero-1
		Tre ruote motrici Swedish disposte a triangolo movimenti omnidirezionali sono possibili	Stanford wheel Tribolo EPFL, Palm Pilot Robot Kit (CMU)
		Tre ruote motrici sincronizzate sterzanti; l'orientamento non è controllabile	"Synchro drive" Denning MRV-2, Georgia Institute of Technology, I-Robot B24, Nomad 200

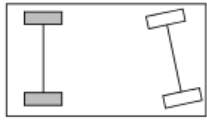
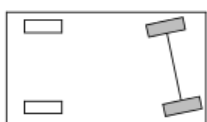
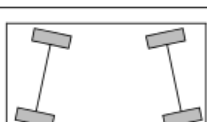

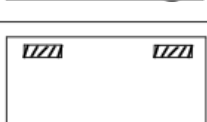
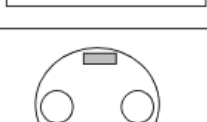
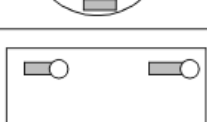
4		Due ruote motorizzate posteriori, 2 ruote sterzanti anteriori; la sterzata deve essere diversa per le 2 ruote per evitare lo slittamento.	Macchina a trazione posteriore
		Due ruote motorizzate sterzanti anteriori, 2 ruote libere posteriori; la sterzata deve essere diversa per le 2 ruote per evitare lo slittamento.	Macchina a trazione anteriore
		Quattro ruote sterzanti e motorizzate	Veicolo a quattro ruote motrici sterzanti Hyperion (CMU)
		Due ruote motrici differenziali e due ruote sferiche	Charlie (DMT-EPFL)
		Quattro ruote motrici swedish	Carnegie Mellon Uranus
		Due ruote motrici differenziali con 2 punti aggiuntivi di contatto	EPFL Khepera, Hyperbot Chip
		Quattro ruote motorizzate basculanti	Nomad XR4000

Tabella 2.1: Configurazioni di ruote per veicoli di laminazione

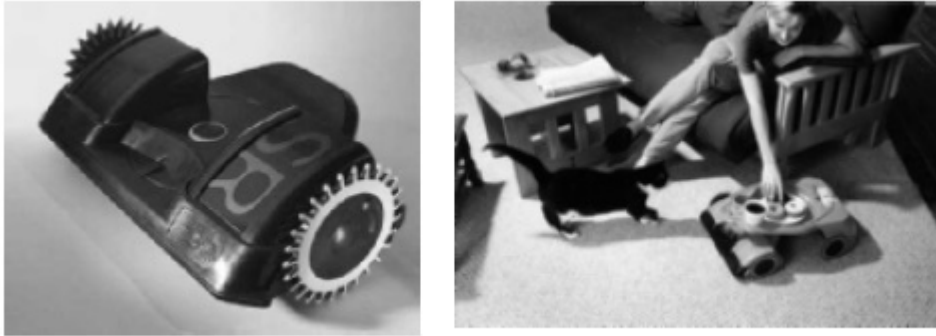


Figura 2.31: Cyé, un robot domestico disponibile in commercio in grado di aspirare e di effettuare consegne a domicilio, è costruita Aethon Inc. (<http://www.aethon.com>). ©Aethon Inc.

questa configurazione, il robot è davvero omnidirezionale perché, anche se le ruote basculanti sono disposte in direzione perpendicolare alla direzione di marcia desiderata, il robot può ancora muoversi nella direzione desiderata sterzando queste ruote. Poiché l'asse verticale è traslato rispetto al punto di contatto col suolo, il risultato di questa rotazione si traduce in movimento del robot. Altre classi di robot mobili raggiungono un'elevata maneggevolezza, solo leggermente inferiore a quella delle configurazioni omnidirezionali. In tali robot, il movimento in una direzione particolare può inizialmente richiedere un moto rotatorio. Con un telaio circolare ed un asse di rotazione al centro del robot, un robot simile può ruotare senza cambiare la sua impronta a terra. Il più popolare è il robot a due ruote motrici con differenziale dove le due ruote ruotano intorno ad un punto centrale del robot. Uno o due ulteriori punti di contatto a terra possono essere usati per la stabilità, in base alle specifiche applicazioni. In contrasto con le configurazioni di cui sopra, si deve considerare la configurazione con sterzo di Ackerman comune nelle automobili. Tale veicolo ha tipicamente un diametro di svolta che è più grande della vettura. Inoltre, per tale veicolo muoversi lateralmente richiede manovre costituite da ripetuti cambi di direzione in avanti e indietro. Tuttavia, le geometrie di sterzata alla Ackerman sono state particolarmente popolari nel mercato della robotica da hobby, dove un robot può essere costruito partendo da un kit di macchina da corsa con telecomando e l'aggiunta di sensori e attuatori autonomi al meccanismo esistente. Inoltre, la limitata manovrabilità di sterzata alla Ackerman ha un importante vantag-

gio: la direzionalità e la geometria della sterzata fornisce una buona stabilità laterale in curva ad alta velocità.

2.1.2.3 Controllabilità

Vi è generalmente una correlazione inversa tra controllabilità e manovrabilità. Per esempio, i progetti omnidirezionali come ad esempio la configurazione a quattro ruote basculanti richiede un'elaborazione significativa per convertire le velocità rotazionali e traslazionali desiderati in comandi alle singole ruote. Inoltre, tali progetti omnidirezionali hanno spesso maggiori gradi di libertà al volante. Per esempio, la ruota swedish ha un set di rulli folli lungo il perimetro della ruota. Questi gradi di libertà causano un accumulo di slittamento, tendono a ridurre la precisione e ad aumentare la complessità di progettazione. Il controllo di un robot omnidirezionale per una specifica direzione di viaggio è anche più difficile e spesso meno accurato rispetto ai modelli meno manovrabili. Ad esempio, un veicolo con sterzo alla Ackerman può andare direttamente, semplicemente bloccando le ruote sterzanti e attuando le ruote motrici. In un veicolo a trazione differenziale, i due motori collegati alle due ruote devono essere azionati esattamente con lo stesso profilo di velocità che può essere difficile considerando le variazioni tra le ruote, tra i motori, e le differenze ambientali. Nell caso di quattro ruote omnidirezionali invece, come per l'Urano robot, che ha quattro ruote swedish, il problema è ancora più difficile perché tutte e quattro le ruote devono essere guidate esattamente alla stessa velocità per far sì che il robot viaggi su di una linea retta. In sintesi, non vi è alcuna configurazione per un robot ideale che massimizzi contemporaneamente stabilità, manovrabilità e controllabilità. Ogni applicazione di robot mobile pone vincoli univoci sul problema di progettazione del robot, e il compito del progettista è quello di scegliere la configurazione più adatta possibile.

Qui di seguito descriviamo quattro configurazioni specifiche delle ruote, al fine di dimostrare la concreta applicazioni dei concetti discussi sopra per robot mobili impiegati in attività del mondo reale.

2.1.2.4 Azionamento sincronizzato

La configurazione delle unità sincronizzate (figura 2.22) è una disposizione molto popolare di ruote in applicazioni indoor di robot mobili. Si tratta di una configurazione interessante perché, anche se ci sono tre ruote sterzanti e di trazione, solo due motori sono utilizzati in totale. Il motore di traslazione

imposta la velocità di tutte e tre le ruote insieme, e il motore per la rotazione delle ruote gira tutte le ruote insieme su ciascuno dei loro singoli assi sterzanti verticali. Ma è da notare che le ruote vengono sterzate rispetto al telaio del robot, e quindi non vi è alcun modo diretto di ri-orientare il telaio del robot. Infatti, l'orientamento dello chassis non è costante nel tempo a causa di irregolari slittamenti delle ruote, causando errori nella rotazione. L'azionamento sincronizzato è particolarmente vantaggioso nei casi in cui

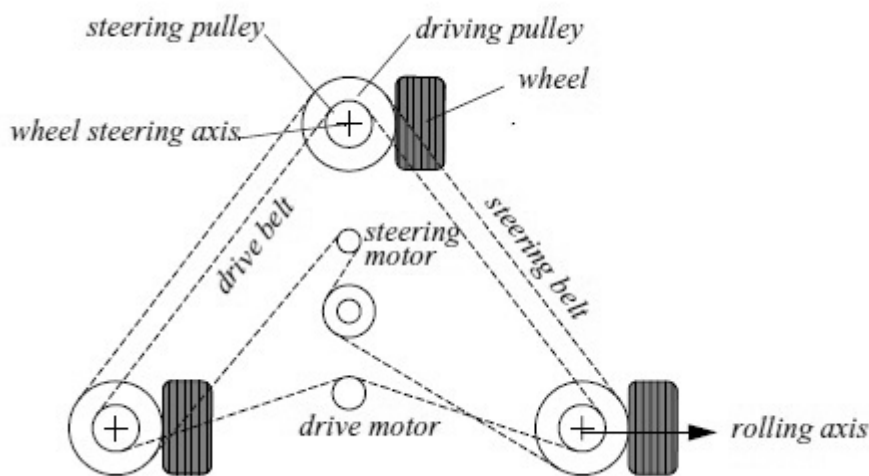


Figura 2.32: Azionamento sincronizzato: Il robot può muoversi in qualsiasi direzione, tuttavia, l'orientamento del telaio non è controllabile.

è richiesta omnidirezionalità. Purché ciascun asse verticale di sterzata è allineato con il percorso di contatto di ciascun pneumatico, il robot può sempre riorientare le sue ruote e muoversi lungo una traiettoria nuova senza cambiare la sua posizione: naturalmente, se il telaio del robot ha direzionalità ed i progettisti intendono riorientare il telaio. In più tale tipo di azionamento, è appropriato solo se combinato con una torretta rotante indipendente che si attacca al telaio della ruota. Robot di ricerca commerciali come il Nomadics 150 o il RWI B21R sono stati venduti con questa configurazione. In termini di navigazione stimata, i sistemi di azionamento sincroni sono generalmente superiori alle varie configurazioni omnidirezionali, ma inferiore ai sistemi con sterzo alla Ackerman. Ci sono due ragioni principali per questo. Innanzitutto, i motori di traslazione fissi delle tre ruote utilizzano un'unica cinghia. A causa di giochi nella trasmissione, ogni volta che il motore di azionamento

viene azionato, la ruota più vicina inizia entra in gioco prima della ruota più lontana, provocando un piccolo cambiamento di orientamento del telaio. Con ulteriori modifiche di velocità del motore, questi piccoli spostamenti angolari si accumulano per creare un grande errore di orientamento durante la navigazione stimata. Secondo, il robot mobile non ha alcun controllo diretto sull'orientamento del telaio. A seconda dell'orientamento del telaio, la spinta della ruota può essere altamente asimmetrica, come mostrato nella figura 2.32. In alcuni casi una varietà di errori può determinare anche lo slittamento pneumatico-terreno e si creeranno maggiori errori nel calcolo dell'orientamento robot.

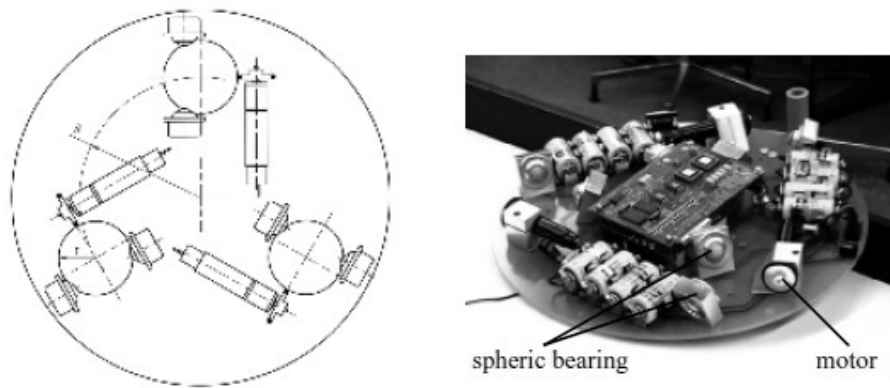


Figura 2.33: Il Tribolo progettato dal Politecnico di Losanna (Istituto Federale Svizzero di Tecnologia di Losanna, Svizzera). Sinistra: Disposizione dei cuscinetti sferici e motori (vista dal basso). Destra: Immagine del robot senza le ruote sferiche (vista dal basso).

2.1.2.5 Azionamento omnidirezionale

Il moto omnidirezionale è di grande interesse per ottenere una completa manovrabilità. Robot omnidirezionali che sono in grado di muoversi in qualsiasi direzione (x, y, θ) in qualsiasi momento sono anche olonomi. Essi possono essere realizzati utilizzando sia ruote sferiche, basculanti, o ruote swedish. Tre esempi di tali robot olonomi sono presentati di seguito.

2.1.2.6 Locomozione omnidirezionale con tre ruote sferiche.

Il robot omnidirezionale rappresentato in figura 2.33 si basa su tre ruote sferiche, ciascuna azionata da un motore. In questo progetto, le ruote sferiche sono sospese da tre punti di contatto, da due cuscinetti sferici e uno da una ruota collegata all'asse motore. Questo progetto fornisce un'eccellente manovrabilità ed è semplice nel design. Tuttavia, è limitato a superfici piane e a piccoli carichi, ed è abbastanza difficile trovare ruote sferiche con elevato coefficiente di attrito.

2.1.2.7 Locomozione omnidirezionale con quattro ruote swedish.

La locomozione omnidirezionale riportata in figura 2.34 è stata utilizzata con successo su diversi robot di ricerca, tra cui Urano della Carnegie Mellon. Questa configurazione consiste in quattro ruote 45° swedish, ciascuna azionata da un motore. Variando il senso di rotazione e le velocità relative alle quattro ruote, il robot può essere spostato lungo qualsiasi traiettoria nel piano e, ancor più impressionante, può ruotare contemporaneamente attorno al suo asse verticale. Per esempio, quando tutte e quattro ruote girano

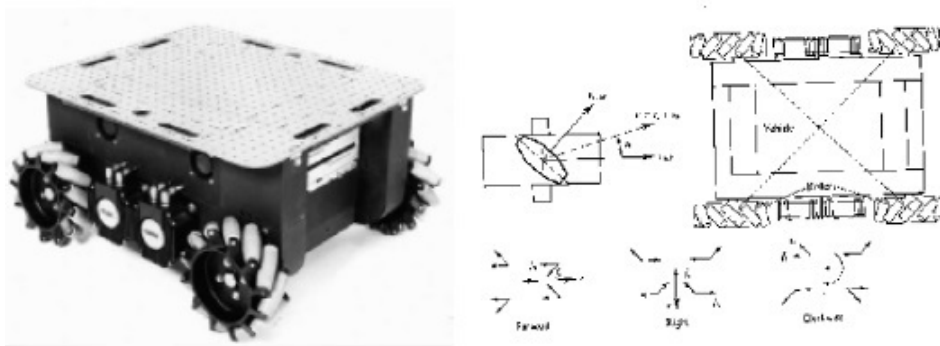


Figura 2.34: Urano della Carnegie Mellon, un robot omnidirezionale con quattro ruote swedish 45° .

avanti o indietro il robot nel suo complesso si muoverà in linea retta in avanti o indietro. Tuttavia, quando una coppia in diagonale di ruote è azionata in una direzione mentre l'altra coppia diagonale viene azionata in direzione opposta, il robot si muoverà lateralmente. Questa disposizione a quattro ruote swedish non è minima in termini di controllo. Perché ci sono solo tre

gradi di libertà nel piano, si può costruire un telaio con tre ruote omnidirezionali swedish di 90 gradi. Tuttavia, gli esempi esistenti, come Urano sono stati progettati con quattro ruote a causa di considerazioni di capacità e la stabilità.

2.1.2.8 Locomozione omnidirezionale con quattro ruote basculanti e otto motori.

Un'altra soluzione è quella di utilizzare ruote basculanti. Questo avviene con il Nomad XR4000 da Nomadic Technologies (figura. 2.35), dandogli una manovrabilità eccellente. Purtroppo, Nomadic ha cessato la produzione di robot mobili. Questi tre esempi sono tratti dalla tabella 2.1, ma non è un elenco esaustivo delle tecniche di locomozione a ruote. Approcci ibridi che combinano locomozione su gambe e ruote, o locomozione su cingoli e ruote, possono anche offrire particolari vantaggi.



Figura 2.35: Il Nomad XR4000 della Nomadic Technologies a quattro ruote basculanti per il movimento oloonomo. Tutte le ruote sono sterzanti e di trazione, richiedendo quindi una sincronizzazione e coordinamento preciso per ottenere un movimento preciso in x , y e θ .

2.1.2.9 Locomozione su cingoli

Nelle configurazioni di ruote di cui sopra, abbiamo fatto l'ipotesi che le ruote non sono autorizzate a sbandare contro la superficie. Una forma alternativa di sterzo, denominato slip / skid, può essere utilizzato per riorientare il robot facendo girare le ruote che sono rivolte verso la stessa direzione a velocità diverse o in direzioni opposte. Il veicolo serbatoio per l'esercito opera in questo modo. I robot che fanno uso di cingoli possiedono una area maggiore in contatto col suolo rispetto ai veicoli su ruote, e questo migliora significativamente la loro manovrabilità su terreni cedevoli. Tuttavia, a causa di maggiore superficie di contatto, modificare l'orientamento del robot solitamente richiede slittamento. A causa della grande quantità di slittamento durante una rivoluzione, il centro esatto di rotazione del robot è difficile da prevedere e il cambiamento esatto nella posizione e nell'orientamento è anche soggetto a variazioni in base all'attrito del terreno. Pertanto, la stima del moto di tali robot è molto imprecisa. In termini di efficienza energetica, questo approccio è ragionevolmente efficiente su terreni cedevoli, ma altrimenti è estremamente inefficiente.

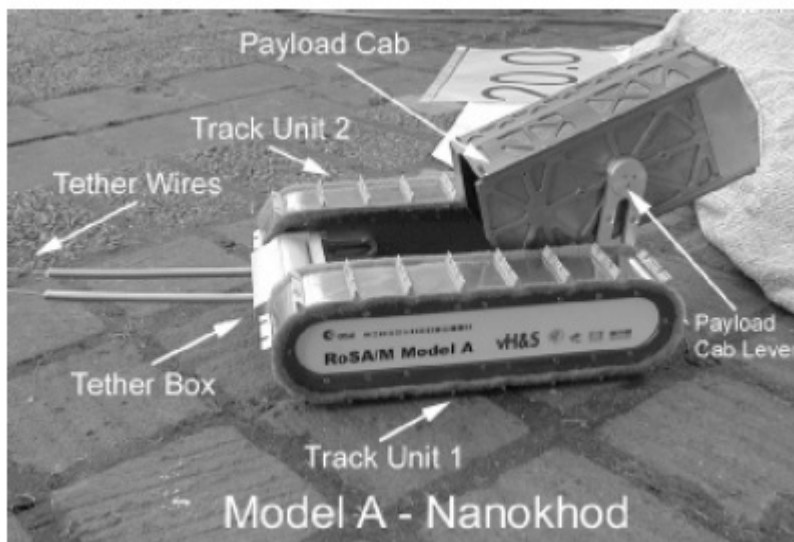


Figura 2.36: Il microrover Nanokhod, sviluppato da Von Hoerner.

2.1.3 Robot Mobili con Azionamento Misto

I robot capaci di camminare offrono la migliore manovrabilità su terreni accidentati. Tuttavia, essi sono inefficienti su terreni piani e hanno bisogno di un controllo sofisticato. Soluzioni ibride, combinando la adattabilità delle gambe con l'efficienza delle ruote, offrono un compromesso interessante. Soluzioni che passivamente si adattano al terreno sono di particolare interesse per la robotica. Il robot Sojourner della NASA/JPL (figura 2.2) rappresenta una soluzione ibrida, in grado di superare gli oggetti fino alle dimensioni delle ruote. Una più recente applicazione di robot simili è stata recentemente prodotta da EPFL (figura 2.37). Questo robot, chiamato Gambero, ha sei ruote motorizzate ed è in grado di salire su oggetti alti fino a due volte il diametro della ruota. Ciò gli consente di salire le scale normalmente. Lo sterzo del rover è realizzato sincronizzando la sterzata delle ruote anteriori e posteriori e la differenza di velocità delle ruote del carrello. Questo permette di effettuare manovre ad alta precisione e rotazione sul posto con un minimo slittamento delle quattro ruote centrali. L'uso di articolazioni parallele per la ruota anteriore ed i carrelli crea un centro virtuale di rotazione a livello dell'asse della ruota. Ciò assicura la massima stabilità e capacità di arrampicata anche per coefficienti di attrito molto basso tra la ruota e la terra. La capacità di salita del gambero è straordinaria rispetto alla maggior parte dei robot di simile complessità meccanica, che deve molto alla geometria specifica e quindi al modo in cui la posizione del centro di massa cambi rispetto alle ruote nel tempo. Al contrario, il Personal Rover possiede la capacità di spostare attivamente la posizione del centro di massa in modo da salire sporgenze che sono maggiori del diametro delle ruote. La maggior parte del peso del Personal Rover è sostenuto in corrispondenza dell'estremità superiore del suo braccio oscillante. Un motore dedicato spinge il braccio in modo da modificare la distribuzione del peso tra anteriore e posteriore per facilitare l'arrampicata. Perché questo schema funzioni, un controllo in anello chiuso deve esplicitamente decidere come spostare il braccio durante una arrampicata. Come la ricerca evolve, la robotica mobile ha a disposizione soluzioni innovative dalla meccanica più sofisticata. Allo stesso tempo, i problemi di controllo della cinematica e della dinamica sono ora così facilmente risolvibili che questi meccanismi complessi possono in generale essere controllati. Così, in un prossimo futuro, possiamo aspettarci di vedere un gran numero di robot mobili ibridi che conservino insieme i vantaggi di diversi meccanismi di locomozione.

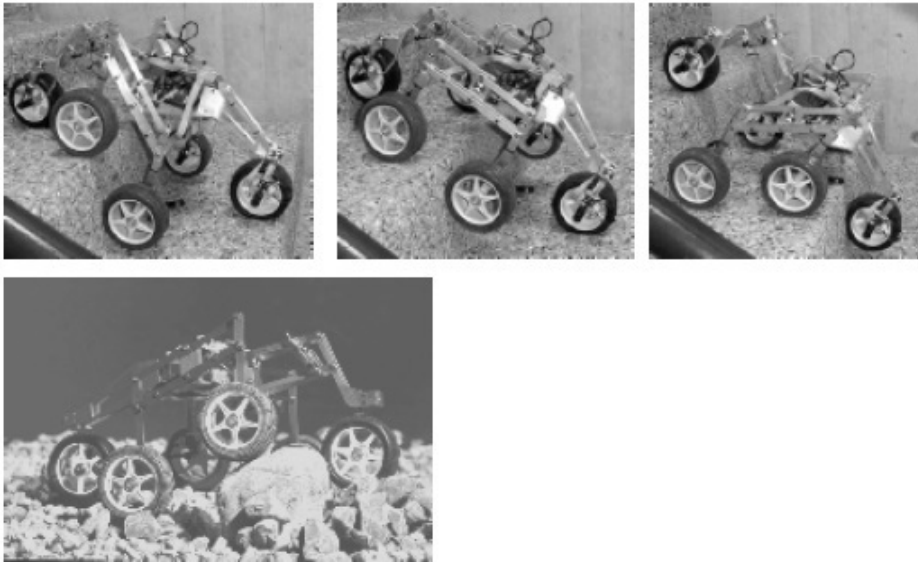


Figura 2.37: Gambero, un robot all-terrain dalla eccezionale capacità di arrampicata.



Figura 2.38: Il Personal Rover, capace di arrampicarsi grazie allo spostamento attivo del centro di massa.

2.2 Tecniche di localizzazione

2.2.1 Localizzazione relativa

I sistemi di localizzazione relativa (detti anche di *dead reckoning*) sono i più utilizzati e diffusi. Tali sistemi basano le stime della posizione sulle misure relative del moto del robot. Poichè ogni misura è ottenuta in relazione alle precedenti, nei sistemi di localizzazione relativa gli errori crescono con il tempo durante la fase di movimento del robot. Tuttavia la semplicità realizzativa e l'economicità li rendono preferibili a sistemi più complessi e accurati, e spesso si trovano accoppiati a sistemi di localizzazione assoluta. Le posizioni relative del robot possono essere acquisite generalmente tramite odometria e navigazione inerziale.

2.2.1.1 Odometria

L'odometria, o Ricostruzione Odometrica, si interessa di calcolare quanta strada è stata percorsa dall'ultima posizione nota. Quest'ultima tecnica, nota anche come Dead Reckoning e già in uso ai tempi delle spedizioni per mare, consente di calcolare la posizione attuale partendo da quella precedente e conoscendo la velocità e la rotta percorsa. Nel caso dei robot mobili basati su ruote, la misura della velocità è facilmente ottenibile conoscendo la velocità di rotazione delle ruote. Attraverso l'impiego di encoder sulle ruote del robot, con l'odometria si è in grado di ricostruire la distanza percorsa e la direzione di navigazione. In genere ciò avviene misurando il numero di rivoluzioni delle ruote del robot nell'intervallo di tempo impiegato per il movimento. I pregi fondamentali dell'odometria sono l'accuratezza sui piccoli spostamenti e soprattutto la semplicità, garantendo misure rapide e poco costose in termini computazionali. Tuttavia l'odometria è afflitta da errori sistematici, ad esempio sollevando una ruota da terra essa girerà come se fosse appoggiata al suolo, ma se ci si dovesse basare sulle sue rotazioni per stabilire il movimento del robot, essa indicherebbe che il robot si è spostato di una certa misura, ma questo non corrisponderebbe alla realtà dei fatti. Assieme a questo problema ce ne sono anche molti altri che inficiano la misura dell'odometria. In generale è possibile distinguere due categorie: errori sistematici ed errori non sistematici. Nella prima categoria ricadono gli errori dovuti ai seguenti fattori:

- Il diametro delle ruote è diverso da una ruota all'altra e può variare nel tempo a seconda delle condizioni climatiche;

- Le ruote possono essere disallineate;
- I dispositivi di rilevamento hanno una risoluzione e una frequenza di campionamento finite.

Gli errori sistematici sono invece dovuti ad agenti esogeni. Tra essi si riportano:

- Percorso su pavimenti non perfettamente piani;
- Passaggio sopra oggetti inaspettati;
- Scivolamento delle ruote dovuto a suolo sdruciolevole, accelerazioni troppo elevate, curve troppo veloci e interazioni con forze esterne.

E' importante distinguere tra errori sistematici e non sistematici per riuscire a minimizzare gli effetti sul calcolo dell'odometria. Gli errori sistematici, ad esempio, sono particolarmente gravi in quanto tendono ad accumularsi costantemente nel tempo, portando a un errore sempre maggiore durante il funzionamento. Questo è particolarmente vero se si prende in considerazione il caso di funzionamento in ambienti indoor, dove il pavimento è solitamente piano e privo di disconnessioni e gli errori sistematici rappresentano la componente principale dell'errore. Se tuttavia ci si sposta in ambienti esterni dove il suolo presenta molte asperità, sono gli errori non sistematici a pesare di più. Va anche sottolineato che, se da un lato gli errori sistematici possono in qualche modo essere compensati, per quelli non sistematici il compito è ben più arduo, in quanto si presentano in maniera casuale e non prevedibile.

2.2.1.2 Encoder

La misura della velocità rotazionale di un asse e, per estensione, di una ruota, è effettuabile mediante un dispositivo chiamato encoder. Di encoder ne esistono svariati tipi, generalmente raggruppabili in due macro categorie:

- *Encoder assoluti*: Gli encoder assoluti sono in grado di rilevare la posizione assoluta dell'asse in movimento. Ciò significa che ne conoscono la posizione anche all'istante dell'accensione. Per questo sono particolarmente indicati per applicazioni di grande precisione e in generale laddove sia richiesta una conoscenza assoluta della posizione (si pensi ad esempio al problema di sapere in quale posizione si trova un braccio robotico per poterlo spostare).

- *Encoder incrementali*: Gli encoder incrementali (anche detti relativi) sono invece in grado di calcolare la variazione di spostamento, senza però sapere nulla sulla posizione iniziale. Questo tipo di encoder è inoltre più semplice da realizzare e interfacciare con un circuito di controllo, oltre a essere particolarmente indicato per il calcolo della velocità.

La classificazione degli encoder può anche essere fatta in base alla tecnologia con cui sono realizzati. Qui di seguito elenchiamo alcuni tipi di encoder:

- Potenzimetrici
- Magnetici
- Induttivi
- Capacitivi
- Ottici

Nei modelli potenziometrici, si sfrutta la capacità di un potenziometro di emettere un segnale elettrico proporzionale alla posizione che assume il suo rotore. Questi tipi di encoder sono pertanto solo di tipo assoluto. I modelli magnetici, induttivi, capacitivi ed ottici possono invece essere sia di tipo assoluto che incrementale. Data la complessità delle soluzioni assolute, ci concentreremo solo sugli encoder di tipo relativo, e in particolare su quelli ottici.

2.2.1.3 Encoder ottici

Gli encoder ottici sono costituiti essenzialmente di due parti: un emettitore e un ricevitore. L'emettitore emette della luce, che può essere bianca o infrarossa, la quale interagisce con un disco dentato e viene catturata dal ricevitore. Il rilevamento avviene sul fronte tra un settore e quello attiguo, di conseguenza un disco con n settori avrà $2n$ fronti rilevabili, spesso chiamati col nome inglese di tic. Gli encoder ottici si possono distinguere principalmente in due categorie:

- A riflessione
- A forcella

Per gli encoder a riflessione, emettitore e ricevitore sono posti sullo stesso piano, rivolti verso un pattern stampato. In genere il pattern è composto da una serie di settori bianchi e neri, o comunque tali da assorbire o riflettere la luce proveniente dall'emettitore. Il ricevitore cattura invece l'eventuale luce riflessa. Gli encoder a forcella, al contrario, sono costruiti in modo che emettitore e ricevitore siano posti sullo stesso asse e rivolti l'uno verso l'altro. La luce emessa dall'emettitore passa attraverso il disco dentato e

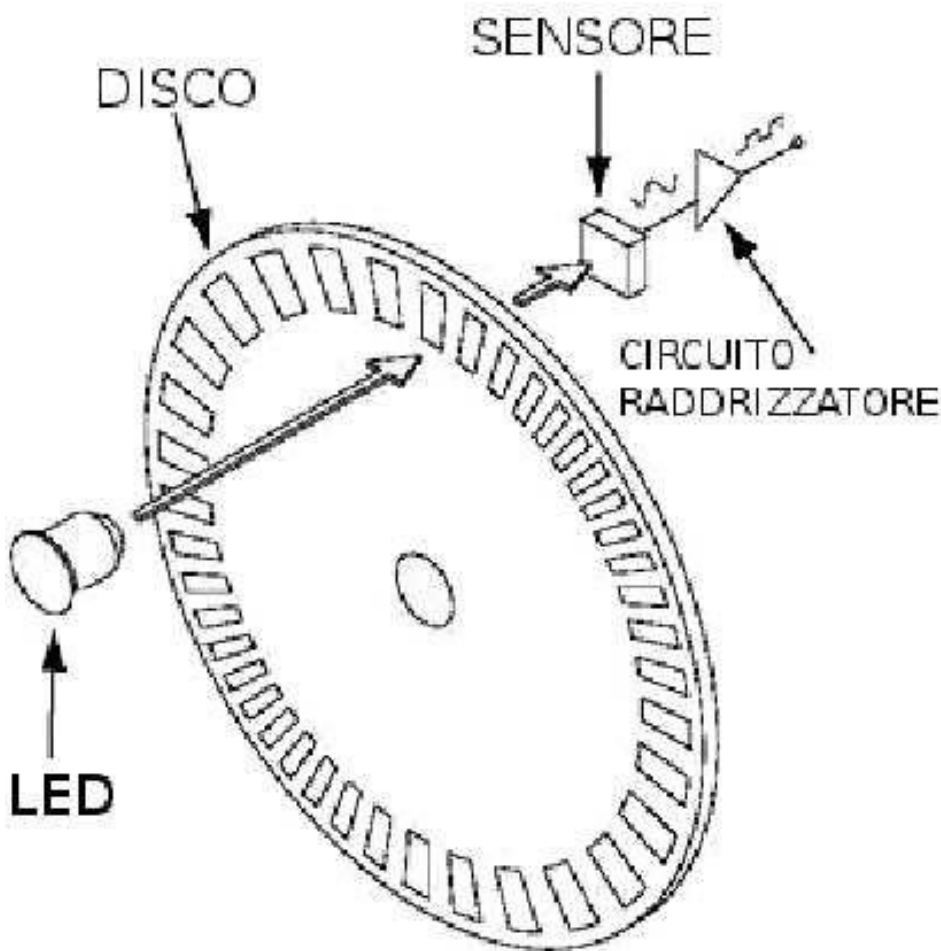


Figura 2.39: Schema di funzionamento di un encoder ottico.

viene catturata dal ricevitore. In questo caso il pattern deve essere composto di materiale trasparente e opaco, alternato. In Figura 2.39 è visibile lo

schema di un encoder: si noti anche la presenza di un circuito raddrizzatore, il cui scopo è quello di portare il segnale analogico in uscita dal sensore a un segnale digitale pronto per essere usato con altri circuiti integrati.

2.2.1.4 Encoder in quadratura

L'uso di un singolo encoder pone un grosso limite al sistema: se è infatti possibile stabilire il numero di tic effettuati, non è però dato sapere in che direzione si sta muovendo il disco. Per ovviare a questo limite si può ricorrere

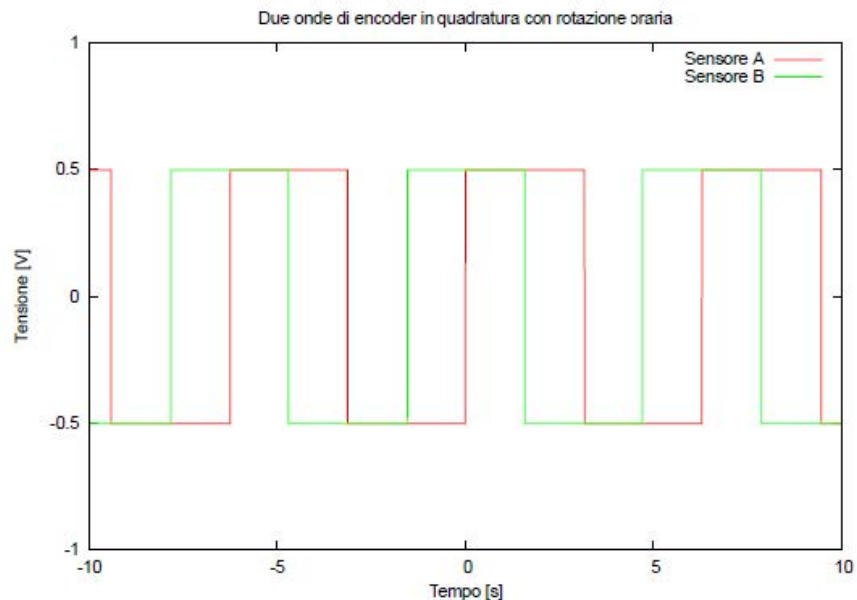


Figura 2.40: Segnale di uscita di due encoder in quadratura con disco in movimento orario.

a una soluzione che prevede l'uso di due sensori per disco, che in questa configurazione prendono il nome di encoder in quadratura. I due sensori vanno posizionati in modo che le onde risultanti siano sfasate di $\pi/2$, come mostrato in Figura 2.40; a livello pratico, i due sensori vanno posizionati di modo che uno sia a metà di un dente, mentre il secondo dev'essere esattamente su un fronte. Ipotizzando un sistema composto da due sensori A e B, posti l'uno a sinistra e l'altro a destra e analizzando i segnali in uscita dai due sensori è infatti possibile stabilire se il disco si sta muovendo dal sensore A

a quello B o viceversa. Nello specifico, nel caso di movimento orario l'onda risultante sarà simile a quella mostrata in Figura 2.40, dove l'onda prodotta dal sensore B è in anticipo rispetto a quella del sensore A. Il viceversa indica una rotazione antioraria.

2.2.1.5 Navigazione inerziale

Nella navigazione inerziale vengono utilizzati giroscopi e accelerometri per misurare velocità di rotazione e accelerazione. Le misure fornite hanno il pregio di essere dirette e di non richiedere informazioni esterne sulla dinamica del robot. Tuttavia, come nel caso dell'odometria, la navigazione inerziale è molto sensibile alle variazioni del terreno, e dovendo integrare i dati una o più volte nel tempo è affetta da errori che crescono con il tempo. I sensori sfruttati da questo metodo di localizzazione possono essere sia propriocettivi (giroscopi, inclinometri) che esteroceettivi (bussole) e permettono di determinare l'orientamento e l'inclinazione del robot. Essi permettono, assieme ad una rapida elaborazione dei dati, di integrare i movimenti per risalire ad una stima della posizione. Infatti anche questo modello di localizzazione, come il precedente, viene denominato Dead Reckoning.

2.2.1.6 Bussole

I due sensori più moderni, che misurano la direzione dei flussi magnetici sono le bussole ad effetto Hall e le flux gate. Entrambe hanno vantaggi e svantaggi, che verranno descritti di seguito. L'effetto Hall descrive il comportamento del potenziale elettrico in un semiconduttore in presenza di un campo magnetico. Quando una corrente costante viene fatta scorrere lungo il semiconduttore, si crea una differenza di potenziale nella direzione perpendicolare, in base all'orientamento del semiconduttore relativamente alle linee di flusso magnetico. Il verso della differenza di potenziale generatasi, identifica la direzione del campo magnetico. Così, un singolo semiconduttore provvede alla misura del flusso e della sua direzione lungo una dimensione. Le bussole digitali ad effetto Hall sono molto popolari nell'ambito della *mobile robotics*, essi contengono due di questi semiconduttori che misurano il campo magnetico lungo due assi, ottenendo così una delle otto possibili direzioni fornite dalla bussola. Gli strumenti sono poco costosi ma soffrono anche di alcuni svantaggi. La risoluzione della bussola digitale ad effetto Hall è scarsa, inoltre, fonti interne di errore includono la non linearità dei sensori di base e gli errori sistematici di polarizzazione a livello del semicon-

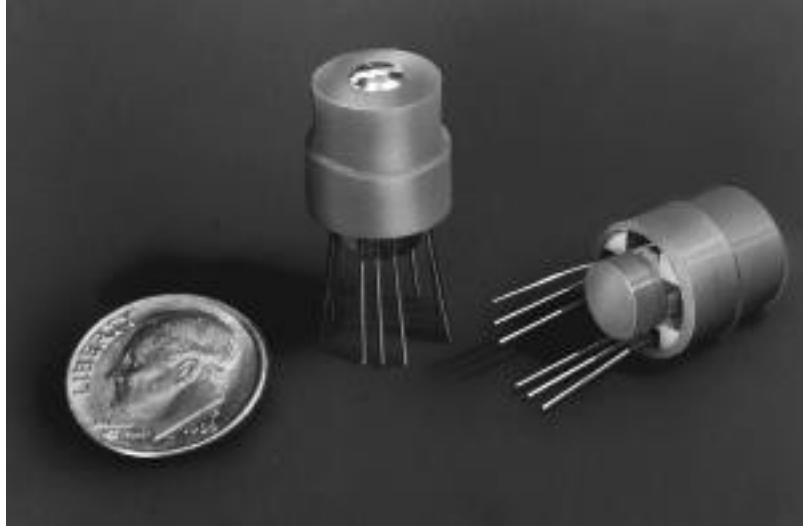


Figura 2.41: Bussole digitali

duttore. Il circuito risultante deve eseguire un filtraggio significativo delle informazioni, abbassando così la larghezza di banda della bussola. In termini di robotica mobile essa risulta troppo lenta. Ad esempio, le bussole di Figura 2.41 impiegano 2.5 secondi per reimpostarsi dopo una rotazione del robot di 90 gradi. La bussola fluxgate opera su un principio differente. Due piccole bobine sono avvolte attorno a dei nuclei di ferrite e vengono fissate perpendicolari le une alle altre. Quando viene fatta scorrere corrente alternata in entrambe le spire, il campo magnetico causa spostamenti di fase in funzione del suo allineamento rispetto ad ogni bobina. Misurando entrambi gli slittamenti di fase, si può ottenere la direzione del campo magnetico lungo due dimensioni. La bussola fluxgate può misurare accuratamente il modulo di un campo magnetico con maggiore accuratezza e risoluzione rispetto alla bussola ad effetto Hall, d'altro canto sono anche più grandi e più costose di quest'ultime. In definitiva, indipendentemente dal tipo di bussola utilizzata, un grave inconveniente relativo all'utilizzo del campo magnetico terrestre per applicazioni robotiche coinvolge i disturbi che questo può subire, dovuti ad altri oggetti magnetici o a altre strutture. In particolare negli ambienti interni, per quanto concerne la robotica mobile, si è spesso evitato di utilizzare le bussole, anche se in teoria dovrebbero fornire utili informazioni sull'orientamento locale, pure in presenza di strutture d'acciaio.

2.2.1.7 Giroscopi

I giroscopi sono sensori che preservano la loro posizione relativa ad un sistema di riferimento fisso. Essi provvedono ad una misura assoluta di velocità e accelerazione angolare, e misurazioni di posizione e velocità relative ad un sistema inerziale fissato. Vengono classificati in base a due categorie, giroscopi meccanici e giroscopi ottici. Il meccanismo di funzionamento dei giroscopi

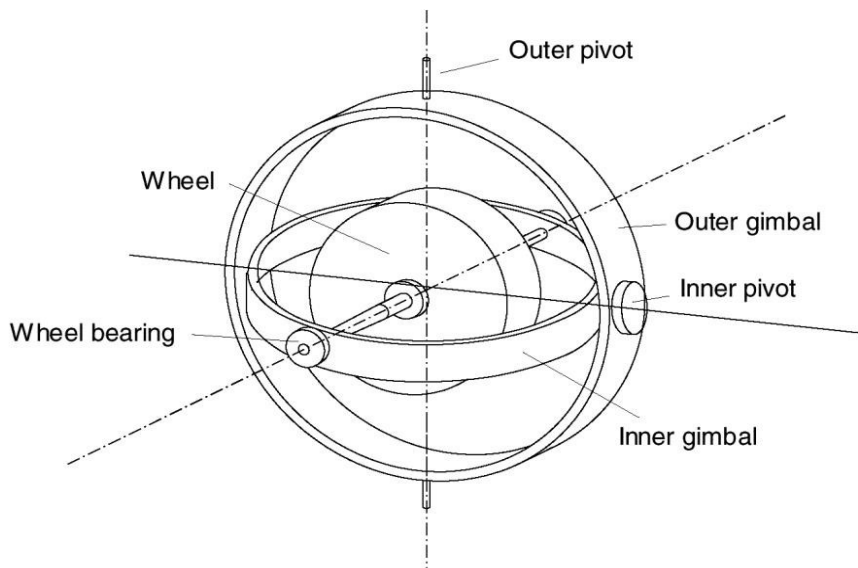


Figura 2.42: Giroscopio meccanico

meccanici si basa sulle proprietà inerziali dei rotori. Mettendo una ruota in rotazione attorno al suo asse verticale, essa avvertirà una reazione lungo l'asse orizzontale, dovuto al momento angolare associato alla velocità di rotazione. La coppia che scaturisce è proporzionale alla velocità di rotazione della ruota, alla sua inerzia, ed alla velocità di precessione. Impostando il rotore opportunamente si può far sì che non venga trasmessa alcuna coppia dall'outer pivot all'asse di rotazione del rotore. L'asse di rotazione risulta così stabile nello spazio, ovvero, fissato nel sistema di riferimento inerziale. Tuttavia, l'attrito nei cuscinetti del rotore introduce alcuni piccoli momenti, limitando la stabilità del giroscopio a lungo termine ed introducendo quindi piccoli errori crescenti nel tempo. Per la navigazione bisogna inizialmente stabilire l'asse di rotazione. Se esso è allineato in direzione nord-sud, la rotazione terrestre non ha effetto sull'asse orizzontale del giroscopio. Se esso

punta verso est-ovest, l'asse orizzontale è in grado di leggere la rotazione terrestre. I giroscopi ottici sono più innovativi rispetto ai precedenti; sono sensori di velocità angolare che sfruttano due fasci di luce monocromatica, o laser, emessi dalla stessa fonte, dunque non hanno parti meccaniche in movimento. Si fondano sul principio che la velocità della luce non varia e, quindi, i cambiamenti geometrici comportano cambiamenti nel tempo richiesto dal fascio di luce per raggiungere la propria destinazione. Un raggio laser viene fatto scorrere in una fibra ottica in senso orario, l'altro invece in senso antiorario. Siccome il raggio laser che viaggia in direzione della rotazione vede un percorso leggermente più breve rispetto al concorrente, avrà una frequenza più alta. Questo principio è conosciuto come effetto Sagnac. La differenza di frequenza tra i due raggi è proporzionale alla velocità angolare del rotore. Per rendere questa differenza di frequenza misurabile, il sensore è una bobina su cui viene avvolta una fibra ottica di lunghezza di circa 5 km.

2.2.1.8 Accelerometri

Un accelerometro è un dispositivo usato per misurare tutte le forze esterne agenti su di esso, inclusa la gravità. Esso appartiene alla classe dei sensori propriocettivi. Concettualmente un accelerometro meccanico è un sistema massa-molla-smorzatore, ma al giorno d'oggi gli accelerometri sono spesso *Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS)* composti da una struttura simile ad una molla contenente una massa di prova. L'effetto smorzante è

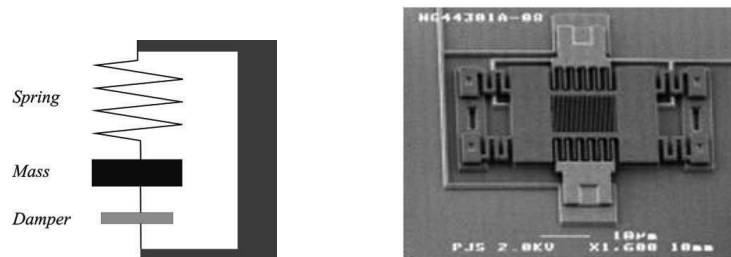


Figura 2.43: (a) principio di funzionamento di un accelerometro meccanico, (b) accelerometro MEMS.

dovuto al gas che viene sigillato nel dispositivo. Quando una forza esterna viene applicata, la massa di prova si scosta dalla posizione neutrale e misurando questo spostamento si può risalire all'entità della forza. Un solo accelerometro misura l'accelerazione lungo un solo asse. Montando tre acce-

lerometri ortogonalmente rispetto agli altri, si può ottenere un accelerometro omnidirezionale.

2.2.1.9 Inertial measurement unit (IMU)

Un dispositivo IMU sfrutta giroscopi ed accelerometri per stimare la posizione, la velocità e l'accelerazione relativa di un veicolo in movimento. Esso viene spesso usato come componente addizionale per la navigazione in navi ed aerei. L'IMU stima la posizione del veicolo con sei gradi di libertà: la posizione (x, y, z) e l'orientamento (rollio, inclinazione, imbardata). Oltre alla stima della posizione vengono calcolate anche velocità ed accelerazione. Per stimare la velocità, bisogna conoscere il suo valore iniziale posseduto dal veicolo. Sfruttando i sensori sopracitati, il dispositivo è in grado di stimare l'accelerazione istantanea del veicolo, che viene poi riportata nel sistema di riferimento locale, rispetto alla gravità terrestre. A questo punto il vettore gravità può essere estratto dalla misurazione effettuata. Il valore dell'accelerazione risultante può essere integrato per ottenere la velocità, dopodiché viene integrato nuovamente per ottenere la posizione, ammesso che la velocità e la posizione iniziale siano conosciute a priori. Si è osservato che i dispositivi IMU sono estremamente sensibili alla misura degli errori, sia nei giroscopi che negli accelerometri. Dato che le integrazioni sono effettuate nel tempo, dopo lunghi periodi di operazioni gli IMU vanno alla deriva. Per poter ovviare a questo problema c'è bisogno di misure esterne, ovvero tramite fotocamera o GPS.

2.2.1.10 Il filtro di Kalman

Come si è visto nella sezione 2.2.1.1, l'odometria non è in grado di fornire con precisione una stima della posizione del robot, essendo soggetta a errori. Si cerca quindi di affiancare ad essa un sistema che possa restituire la posizione assoluta del robot nel sistema di riferimento terrestre, con una buona precisione. Viene in aiuto il filtro di Kalman, inventato negli anni '50 da Rudolph Emil Kalman come tecnica di filtraggio e predizione per sistemi lineari. Per quanto riguarda i robot, con l'eterogeneità e il largo numero di sensori adottati, si giunge a diverse misure della posizione con differenti errori e scarsità nella precisione a seconda del sensore. Per una localizzazione ottimale bisogna raccogliere le informazioni fornite da tutti i sensori e fonderle per ottenere una stima sulla posizione ancor più precisa. Il filtro di Kalman permette di effettuare questa operazione di fusione, incorporan-

do tutte le informazioni, indipendentemente dalla precisione, per stimare il valore attuale della variabile d'interesse (es. posizione del robot). La teoria è valida per sistemi lineari, nel caso dei robot non sempre il sistema può essere considerato tale, e dunque il filtro dovrà essere applicato solo dopo che il sistema sarà stato linearizzato. La Kalman filter localization sfrutta la funzione Gaussiana di densità di probabilità per rappresentare l'affidabilità (o credibilità) della stima del robot, generalmente chiamata belief, $bel(x_t)$ per determinare il modello del moto e il modello di misura. Una funzione gaussiana è definita dal suo valor medio μ_t e dalla covarianza Σ_t , durante le fasi di predizione e di misura solo questi due parametri vengono aggiornati. Comunque, l'assunzione fatta dal filtro di Kalman limita la scelta dell'affidabilità iniziale $bel(x_0)$, ad una gaussiana, il che indica una dovuta conoscenza della posizione iniziale con buona approssimazione. Perciò il robot non può recuperare la posizione se si dovesse perdere. Il filtro di Kalman risolve il problema della position tracking ma non quello del kidnapped robot problem.

2.2.1.11 Kalman filter localization

L'applicazione del filtro di Kalman alla localizzazione richiede che il *localization problem* venga posto come un problema di fusione dei sensori, dato che il filtro è un ottimo ed efficiente strumento di fusione dei dati da essi provenienti. La procedura che permette di migliorare l'affidabilità del robot con metodi probabilistici si svolge in due fasi, *prediction update* e *measurement update*, ovvero miglioramento delle previsioni e miglioramento delle misure. Il primo passo è la prediction update, diretta applicazione del modello d'errore Gaussiano al percorso misurato dall'encoder presente sul robot. La measurement update, invece, è composta da più step che possono essere così schematizzati:

1. *Observation step* (fase di osservazione, in cui il robot colleziona dati dai sensori installati ed estrae le appropriate features (e.g. linee, porte, landmarks).
2. Nello stesso istante, in funzione della precedente posizione sulla mappa, il robot genera una measurement prediction (previsione sulla misura) che consiste nell'aspettarsi determinate features da parte del robot, durante l'osservazione dalla posizione in cui esso crede di essere.

3. Nella *matching step* (fase di confronto) il robot esegue un raffronto tra le features estratte durante l'osservazione e quelle selezionate durante la *measurement prediction*.
4. Infine, il filtro di Kalman fonde le informazioni ricavate dai confronti al fine di aggiornare l'affidabilità del robot (e.g. riguardo la sua posizione) nella *estimation step*.

La localizzazione mediante filtro di Kalman può rivelarsi un utile strumento affiancandolo ad esempio al metodo dell'odometria, in maniera tale da ridurre l'errore che si accumula nel tempo e fornire un valore della posizione con maggiore precisione.

2.2.2 Localizzazione assoluta

I sistemi di localizzazione assoluta calcolano la posizione assoluta del robot senza basarsi su misure precedenti. La posizione del robot è infatti calcolata sulla misura corrente, e non viene stimata integrando misure passate, come invece avviene nei sistemi di localizzazione relativa. Il pregio di questi sistemi è naturalmente l'assenza di errori crescenti col tempo durante il movimento del robot. I sistemi di localizzazione assoluta si dividono in diversi metodi basati su landmarks, beacons, active ranging systems, route-based e map based. Vengono esposti anche sistemi di localizzazione probabilistica, come il Metodo Monte Carlo e la Markov localization.

2.2.2.1 Metodo Route-based

Semplice quanto efficace, questo metodo di localizzazione prevede che il percorso del robot sia esplicitamente marcato, affinché esso possa determinare la propria posizione, non relativa ad un sistema di riferimento globale ma al percorso specifico che gli viene imposto. Esistono diverse tecniche per marcare la strada che il robot deve compiere. In ogni caso, una di esse prevede la creazione di un vero e proprio sistema di binari che, a differenza di quello fisico utilizzato in ambito ferroviario, è maggiormente flessibile e interfacciabile con gli esseri umani senza essere d'intralcio. Ad esempio, una vernice trasparente con elevato potere riflettente, soprattutto per raggi ultravioletti, potrebbe essere usata per marcare il percorso che solo il robot, utilizzando un apposito sensore, sarebbe capace di individuare (e.g. la figura 2.44). In alternativa, un cavo guida sepolto al di sotto della pavimentazione potrebbe essere rilevato dal robot attraverso l'utilizzo di bobine a induzione, locate



Figura 2.44: Robot scaffali che si spostano autonomamente seguendo il percorso rappresentato sul terreno

all'interno dello chassis. In ognuno di questi casi, il problema della localizzazione viene effettivamente ovviato forzando il robot a seguire sempre lo stesso percorso prestabilito. Attualmente in ambito industriale sono già presenti dei veicoli con guida autonoma, capaci di effettuare delle deviazioni dal percorso stabilito per poter evitare degli ostacoli. Tuttavia, il costo di questa affidabilità estrema è ovvio: il robot è molto meno flessibile, dunque una volta imposto questo tipo di localizzazione, ad ogni cambiamento necessario del comportamento del robot è richiesta una rielaborazione del sistema e, quindi, molto tempo.

2.2.2.2 Localizzazione tramite landmark

I landmark sono features (letteralmente caratteristiche) dell'ambiente che il robot è in grado di rilevare e riconoscere utilizzando i propri sistemi sensoriali. Attraverso l'analisi dei dati ricavati dalla visione artificiale, un robot determina l'esistenza di un landmark ed esegue successivamente un confronto con le sue informazioni riguardo la posizione del landmark stesso. Attraverso tali informazioni il robot è in grado di localizzarsi con successo. I landmark possono essere forme geometriche (come rettangoli, linee, cerchi) e possono contenere informazioni aggiuntive (es. Bar-code). Il robot deve cercare autonomamente i landmark, avendo memorizzato la loro posizione e

le caratteristiche; i metodi per la loro rilevazione variano a seconda del tipo di landmark scelto. E' quindi opportuno distinguere tra landmark artificiali e naturali:

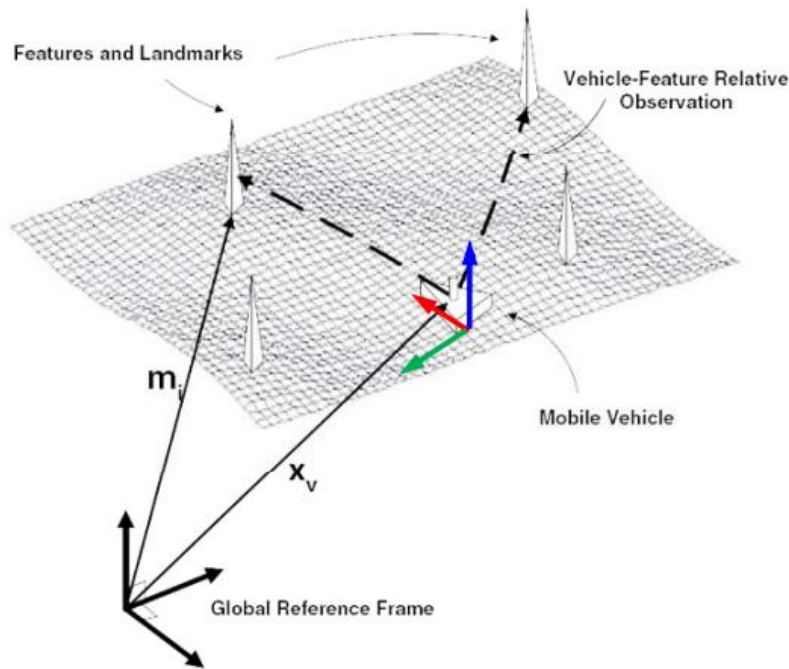


Figura 2.45: Un robot in cerca di landmark per potersi localizzare

- *Landmark artificiali:* vengono creati appositamente per la localizzazione. In genere si utilizzano oggetti piani, dalle forme geometriche e dai colori facilmente riconoscibili (e.g. cerchio metà nero metà bianco, led attivi, sensori ad infrarossi, ecc.). I landmark artificiali sono utilizzati con successo generalmente in ambienti molto standardizzati, quali ad esempio uffici e laboratori. Nonostante siano creati ad hoc dalla mano dell'uomo, i landmark artificiali soffrono comunque di notevoli problemi di riconoscimento. All'aumentare dell'angolazione e della distanza dal robot, infatti, i landmark tendono a diventare irriconoscibili, poiché cambia la forma e nascono problemi di illuminazione e visibilità. La capacità computazionale richiesta dal processo di riconoscimento risulta quindi decisamente elevata.

- *Landmark naturali*: sono landmark che fanno parte dell'ambiente di lavoro del robot, e non devono essere costruiti appositamente (e.g. luci, porte, corridoi, ecc.). I landmark naturali soffrono degli stessi problemi dei landmark artificiali, tuttavia sono spesso preferibili a questi ultimi in quanto non è necessario modificare l'ambiente di lavoro del robot.

L'approccio più diffuso verso questo metodo di localizzazione prevede l'utilizzo di landmark naturali già presenti nell'ambiente. In generale vengono scelti elementi tipici di ambienti quali uffici e laboratori: porte, finestre, spigoli. Il problema del riconoscimento è legato all'alta possibilità di occlusione degli oggetti. Proprio per superare il problema delle occlusioni si utilizzano spesso elementi dell'ambiente la cui possibilità di risultare nascosti è molto bassa.

2.2.2.3 Beacon based localization

La navigazione tramite beacon (boe) è di comune utilizzo sulle navi e sugli aerei, ma viene spesso applicata anche alla robotica mobile. Le active beacon possono essere rilevate facilmente e provvedono ad un accurato posizionamento sfruttando minima capacità computazionale, ma esse incorrono anche in elevati costi di installazione e manutenzione. La maggioranza di questi sistemi comprende un set di beacon sistemate nell'ambiente in posizioni note. Il robot mobile viene equipaggiato con uno o più sensori che gli permettono di osservare tali beacon, poi il sistema di navigazione sfrutta queste osservazioni e la conoscenza della posizione dei beacon per localizzare il veicolo robot. Esistono due metodi principali per calcolare la posizione assoluta del robot attraverso l'utilizzo di beacon: la triangolazione e la trilaterazione.

- *Triangolazione*: utilizza le distanze e gli angoli relativi a tre o più beacon visibili dal robot. Attraverso l'analisi di tali dati il robot è in grado di calcolare la propria posizione e orientazione nel sistema di riferimento assoluto.
- *Trilaterazione*: attraverso l'analisi della sola distanza da almeno tre beacon, il robot è in grado di calcolare la propria posizione. In base alla distanza da un riferimento il robot sa di trovarsi su una circonferenza di raggio pari alla distanza dal landmark stesso. Intersecando almeno tre circonferenze il robot è in grado di localizzarsi con successo. Un tipico esempio di trilaterazione è il sistema GPS.

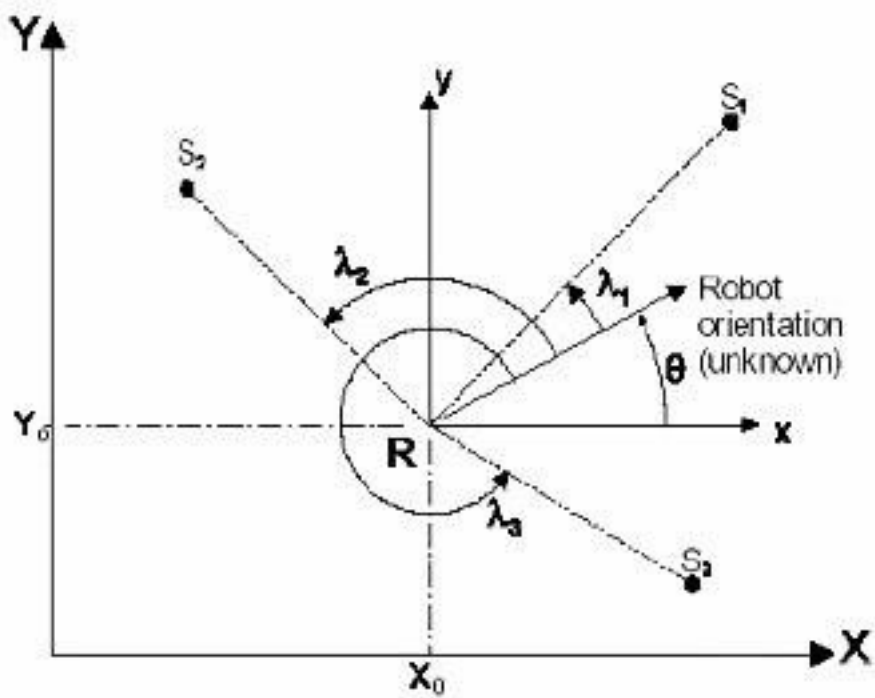


Figura 2.46: Esempio di calcolo della posizione del robot R con tecniche di triangolazione.

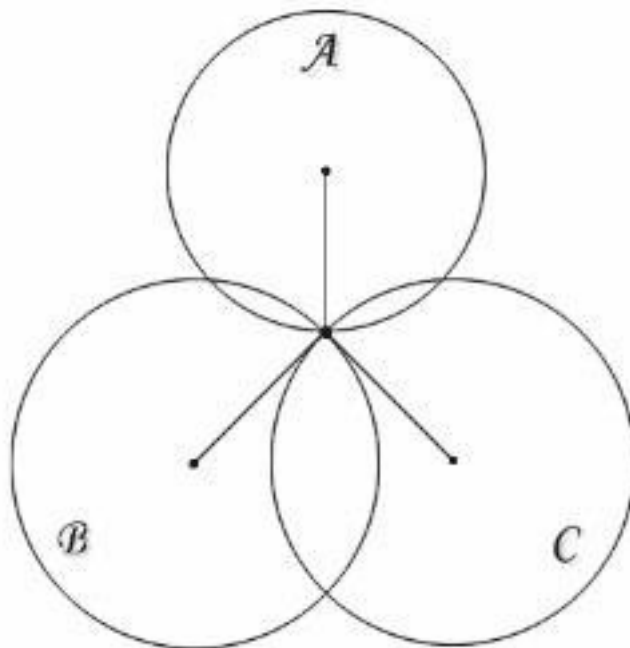


Figura 2.47: Esempio di calcolo della posizione del robot con tecniche di trilaterazione. Per identificare univocamente la posizione sono necessarie almeno tre circonferenze.

In questo metodo appena descritto, affinché l'operazione di localizzazione abbia successo, è necessario che il robot conosca a priori le posizioni dei beacon e che riceva correttamente i segnali inviati dalle boe. Essendo apparecchiature di trasmissione, i beacon vanno incontro a tutti i problemi tipici del settore: disturbi, diminuzione di potenza, riflessioni e rifrazioni dei segnali. Le boe inoltre non sono in grado di inviare il segnale in tutte le direzioni cosicché durante la navigazione del robot alcuni landmark potrebbero risultare nascosti.

2.2.2.4 Active Ranging Systems

Tra i sensori più popolari in robotica, vanno menzionati quelli appartenenti alla categoria dei ranging sensors, cioè i sensori ad ultrasuoni (o sonar sensors), ed i laser range finders. Il motivo per cui essi sono comunemente adottati è che molti di questi possono essere trovati ad un basso prezzo di partenza, e, cosa più importante, tutti i ranging sensors forniscono in output una misura diretta delle distanze dal robot agli oggetti che lo circondano. Durante la navigazione, per individuare ostacoli da oltrepassare, spesso i robot si servono di questa categoria di sensori, rendendoli partecipi al processo di localizzazione.

2.2.2.5 Ultrasonic Rangefinder

Più comunemente detto sensore ad ultrasuoni, funziona attraverso la trasmissione di un pacchetto di onde di pressione e la successiva misura del tempo impiegato dal pacchetto per tornare al ricevitore, dopo essere stato riflesso dall'oggetto su cui è stato puntato. La distanza di questo oggetto può essere calcolata conoscendo la velocità di propagazione del suono e il tempo misurato. La scelta di questo sensore va effettuata osservando la frequenza di emissione dei segnali, la quale è legata al massimo raggio d'azione che può essere coperto. Frequenze più basse corrispondono ad un lungo raggio d'azione, però con lo svantaggio di un maggiore tempo di risposta da parte del dispositivo. I sensori ad ultrasuoni utilizzati dai robot hanno un raggio d'azione nominale che va dai 12 cm ai 5 m, ma esso corrisponde ad una riflessione del segnale, da parte dell'oggetto, in maniera perpendicolare. Quando il robot è in movimento è molto probabile che il ricevitore catturi dei segnali che sono stati deviati o riflessi con angolazioni differenti. Questo comporta errori e imprecisioni nella ricostruzione dell'ambiente circostante, e rappresenta lo svantaggio principale di questi sensori.

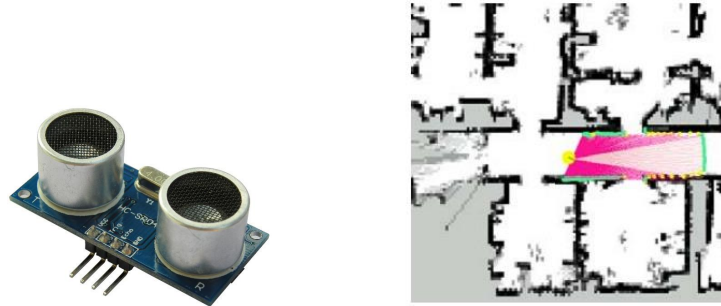


Figura 2.48: A sinistra un tipico sensore ad ultrasuoni per applicazioni robotiche. A destra una scansione dell'ambiente tramite sonar.

2.2.2.6 Laser Range Finder

Conosciuto anche come LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), è un sensore che permette di determinare la distanza di un oggetto o una superficie utilizzando un impulso laser. Come per il sonar, la distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale riflesso. Un meccanismo con specchio consente di spostare il raggio laser emesso in maniera da coprire l'angolazione desiderata. Rispetto al precedente esso presenta dei significativi vantaggi, come ad esempio un raggio d'azione più ampio (si raggiungono anche i 30 m) e una maggiore accuratezza. Lo svantaggio principale di questo sensore è la visibilità limitata in alcune condizioni atmosferiche, come piccole particelle d'acqua che potrebbero distorcere o attenuare la luce del laser, così come oggetti molto scuri potrebbero assorbire gran parte della luce emessa dal sensore.

2.2.2.7 Map-based positioning

Anche conosciuta come map matching (confronto con mappa), la map-based positioning è una tecnica che sfrutta la sensoristica posseduta dal robot per creare una mappa locale dell'ambiente circostante. Questa viene poi confrontata con una mappa globale precedentemente immessa nella memoria del robot; se viene trovata una corrispondenza, il robot può risalire alla sua posizione e il suo orientamento in quell'ambiente. La mappa globale pre-memorizzata dal robot può essere un modello CAD o può costruirla autonomamente, attraverso i dati provenienti dai sensori visivi. Il vantaggio principale di queste tecniche è che sfruttano le strutture già esistenti nei

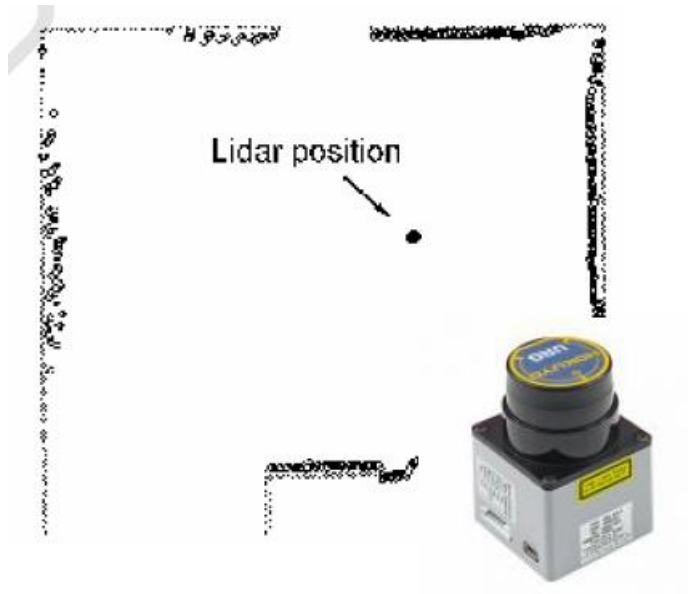


Figura 2.49: Un Laser scanner, ed una tipica identificazione dell'ambiente circostante ottenuta con questo dispositivo.

principali ambienti interni per ricavare informazioni, senza la necessità di dover modificare l'ambiente. Inoltre, il robot può avvalersi di questa tecnica per generare una mappa aggiornata del territorio circostante, permettendogli di imparare a muoversi in nuovi edifici e migliorare la precisione della localizzazione. I vari step che richiede il procedimento di costruzione di una mappa comprendono estrazione di features da immagini, fusione di dati e determinazione delle corrispondenze tra i dati ricavati e quelli memorizzati. Lo svantaggio di questi procedimenti è la richiesta di features che siano ben distinguibili ed abbastanza stazionarie da poter essere riconosciute con facilità dal robot. La mappa ricostruita dai sensori deve essere abbastanza accurata, il che richiede la disponibilità di un'elevata potenza di calcolo.

2.2.2.8 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

Questa tecnica è un importante sviluppo della tipologia di map building, prevede la contemporanea localizzazione, costruzione, ed eventuale modifica di una mappa in completa autonomia. Ovviamente i sensori del robot hanno un range di funzionamento limitato, così per poter costruire questa mappa

il robot dovrà esplorare fisicamente l'ambiente. Esso non solo deve creare la mappa, ma deve anche farlo mentre si muove e si localizza nell'ambiente. L'obiettivo della tecnica SLAM è quello di ricavare sia una mappa ambientale che una traiettoria da far percorrere al robot, utilizzando esclusivamente i dati ottenuti dai suoi sensori propriocettivi ed esteroceettivi. Questi dati sono quelli di spostamento ricavati dall'odometria e le features (spigoli, bordi, piani) ricavati dai sensori laser, dagli ultrasuoni, o dalle immagini di fotocamera. La tecnica SLAM è di difficile realizzo a causa dei disturbi che affliggono sia le features estratte, sia il percorso stabilito. Assumendo che

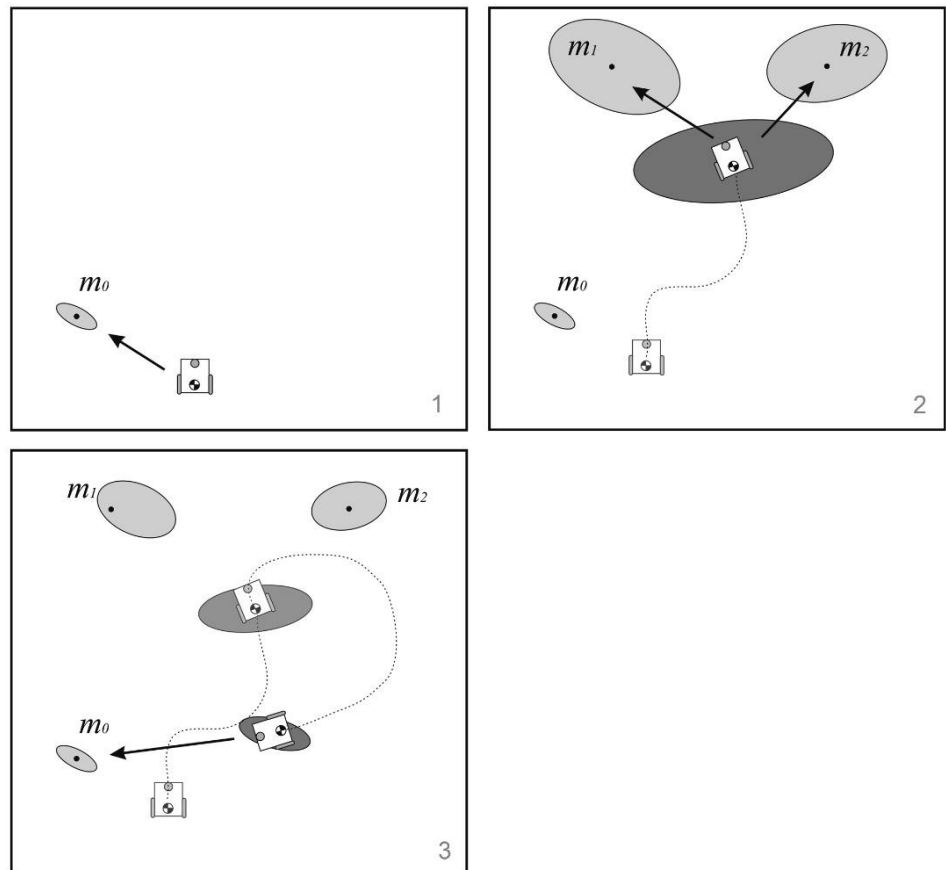


Figura 2.50: Passaggi della procedura SLAM

l'incertezza sulla posizione iniziale sia nulla e che, una volta messo in moto il robot, essa aumenti a causa degli errori dell'odometria, anche gli oggetti rile-

vati e salvati sulla mappa subiranno la stessa incertezza sulla loro posizione. A questi si aggiungono gli errori di misura dovuti alla scarsa sensibilità dei sensori di rilevamento, così la posizione finale degli oggetti sulla mappa non risulterà corretta. Per ridurre quest'incertezza il robot deve osservare delle features di cui conosce l'esatta posizione, come ad esempio dei landmarks che ha già osservato in precedenza e di cui conosce l'ubicazione precisa. Così l'incertezza sulla posizione del robot si riduce e questo si riflette anche sulla misura delle posizioni degli oggetti osservati dal robot.

2.2.2.9 Localizzazione Probabilistica

L'idea principale è quella di modificare la credenza (in letteratura *belief*), ossia la funzione densità di probabilità che descrive la posizione del robot, aumentando la probabilità di trovarsi nella configurazione che maggiormente si avvicina alle misure ricavate in precedenza e diminuendo allo stesso tempo le meno probabili. E' da notare come la densità probabilistica risultante sia una funzione multi-modale, adatta a rappresentare il fatto che le informazioni a disposizione sono insufficienti per determinare in maniera univoca la configurazione attuale del robot. Va sottolineato inoltre che, nonostante ad alcune configurazioni del robot venga diminuita la probabilità di essere quella reale, esse ancora non possiedono una probabilità nulla. Questa è la caratteristica principale della localizzazione probabilistica, che tiene conto del rumore che affligge le letture dei sensori e pertanto tende a non scartare, almeno inizialmente, alcuna ipotesi sulla posizione e sull'orientamento del robot. Man mano che il robot si muove e riceve nuove informazioni sull'ambiente in cui si trova, la tecnica di localizzazione adottata modifica in maniera opportuna la densità di probabilità, che viene sempre più smussata passo dopo passo rispetto a quella dell'istante precedente. Procedendo con tale tecnica, la maggior parte delle probabilità saranno centrate nell'intorno di una singola configurazione e il robot, a questo punto, sarà abbastanza sicuro della posizione in cui si trova. La figura 2.51 riportata di seguito rappresenta un semplice esempio che dovrebbe chiarire quanto appena descritto come si può notare, è una procedura molto simile a quella che sfrutta il filtro di Kalman.

2.2.2.10 Approccio Bayesiano alla localizzazione

Il processo di stima stocastico dello stato parte dalla teoria di Bayes. I filtri Bayesiani sono strumenti matematici che hanno come obiettivo quello di sti-

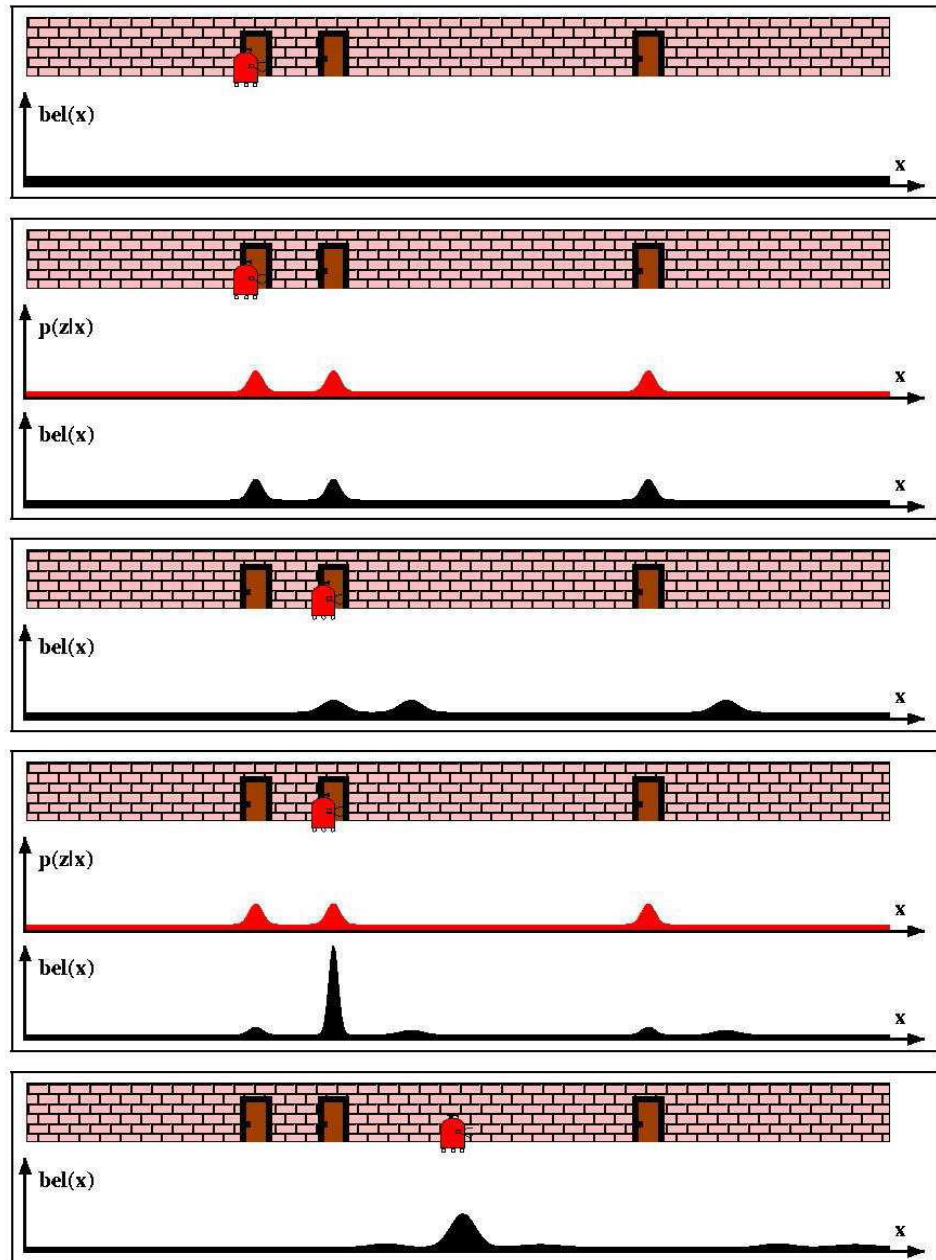


Figura 2.51: Esempio di localizzazione probabilistica, si noti l'analogia con la figura relativa al filtro di Kalman.

mare lo stato x di un sistema dinamico mediante misure sensoriali. Nel caso della localizzazione di un robot mobile, il sistema dinamico è rappresentato dall'insieme robot-ambiente, mentre lo stato è la posizione del robot. Inoltre i filtri Bayesiani assumono che l'ambiente sia Markoviano, cioè i dati passati e futuri sono considerati indipendenti fra loro se è noto lo stato corrente. L'idea chiave della teoria Bayesiana è determinare la funzione densità di probabilità a posteriori dello stato basata su tutte le informazioni disponibili, incluso l'insieme delle misurazioni ricevute.

2.2.2.11 Localizzazione Markov

Questa tecnica affronta il problema della stima dello stato mediante dati provenienti dai sensori ed è un algoritmo probabilistico: invece di mantenere una sola ipotesi riguardo alla configurazione del robot, la localizzazione Markov determina una distribuzione di probabilità sullo spazio di tutte le possibili ipotesi. La rappresentazione permette di pesare in maniera differente tutte le probabilità e prevede un aggiornamento della pdf (densità di probabilità) mediante modelli probabilistici, il modello di evoluzione e il modello di osservazione. Quindi il robot per migliorare la stima della propria posizione può operare in due differenti modi:

- Muovendosi e cercando di individuare punti caratteristici dell'ambiente che siano in grado di togliere ambiguità alla propria posizione;
- Rimanendo fermo e percependo l'ambiente.

Nel primo caso l'aggiornamento della pdf è dovuto al solo controllo, senza aver ancora effettuato alcuna misura. Nel secondo caso, invece, viene aggiornata facendo riferimento ai dati sensoriali, mediante la probabilità condizionata. La localizzazione Markov utilizza inoltre schemi complessi ed accurati per rappresentare l'incertezza sullo stato iniziale e sulle misure dei sensori, spingendosi oltre la più semplice assunzione che debba avere densità gaussiana, per poter affrontare anche problemi di localizzazione globale. Tale approccio viene utilizzato soprattutto per la navigazione basata su landmark e in situazioni in cui lo spazio di stato è organizzato secondo la struttura topologica dell'ambiente. La localizzazione Markov prevede che il robot abbia a disposizione una mappa geometrica dell'ambiente, senza fornirgli ovviamente alcuna informazione sulla propria posizione e sul proprio orientamento all'istante iniziale; assegna perciò una distribuzione uniforme di probabilità a tutte le variabili che compongono lo stato del sistema.

Nonostante la localizzazione Markov sia uno dei metodi di localizzazione probabilistica più robusto e anche piuttosto semplice a livello concettuale, soffre di alcuni inconvenienti che lo rendono difficilmente applicabile. Esso infatti prevede una richiesta computazionale molto elevata ed è soggetto ad instabilità in ambienti dinamici, dovuta all'intenso utilizzo dell'assunzione di Markov nella derivazione matematica.

2.2.2.12 Monte Carlo Localization

Detta MCL, questo tipo di localizzazione in pratica è un algoritmo probabilistico, molto simile alla localizzazione Markov, ma leggermente meno robusto e con il vantaggio di essere poco oneroso dal punto di vista computazionale. I primi metodi Monte Carlo risalgono agli anni settanta e di recente sono stati riscoperti e utilizzati in problemi statistici, di inseguimento della posizione, di computer vision, etc. Attualmente la MCL è di sicuro una delle tecniche maggiormente usate, in quanto è in grado di risolvere problemi di localizzazione globale e non solo; infatti affronta con successo anche il problema del kidnapped robot problem. Si basa sul concetto di filtro bayesiano ricorsivo che stima la pdf a posteriori mediante l'ausilio di dati sensoriali. La MCL utilizza veloci tecniche di campionamento per rappresentare la distribuzione di probabilità del robot. Quando quest'ultimo si muove o percepisce qualcosa dall'ambiente che lo circonda, si utilizza il metodo importance sampling, per approssimare la pdf a posteriori. La MCL è una tecnica molto accurata, inoltre presenta numerosi vantaggi rispetto alle altre tecniche di localizzazione. Infatti essa è in grado di risolvere situazioni in cui compaiono non linearità nel modello del sistema (a differenza del filtro di Kalman), è in grado anche di ridurre di molto la complessità computazionale richiesta ed è molto semplice da implementare.

2.3 Terramechanics

L'uomo dalla scoperta della ruota (3500 *a.C.* circa) si é dovuto confrontare con le problematiche della locomozione off-road. I veicoli off-road vengono ampiamente utilizzati in ogni parte del mondo dal settore agricolo a quello delle costruzioni, dai trasporti fuori strada alle operazioni militari a partire dalla fine del secolo scorso . Nonostante i rapidi progressi della tecnologia, lo sviluppo di veicoli fuoristrada, per un lungo periodo di tempo , si é basato su esperienze empiriche. Un approccio sistematico per lo sviluppo razionale di veicoli off-road non ha ricevuto notevole attenzione fino alla metà del *XX*° secolo. Il lavoro pionieristico fatto da Bekker ha contribuito a gettare le basi per un ramo distinto della meccanica applicata , che é diventato noto come *Terramechanics* [28]. In senso lato, *Terramechanics* é lo studio del rendimento globale di una macchina in relazione al suo ambiente operativo - il terreno. Si distingue in due rami principali: la meccanica del terreno-veicolo e la meccanica del terreno. La meccanica del terreno-veicolo si interessa delle prestazioni della trazione di un veicolo su un terreno non preparato, della qualità di guida su superfici non preparate, il superamento di ostacoli, il superamento di corsi d'acqua ed altri argomenti correlati. La meccanica del terreno, d'altra parte, si occupa della prestazioni delle macchine fuoristrada operatrici, che hanno lo scopo di lavorare il terreno stesso, come mediante le operazioni di fresatura del terreno o nel caso del movimento terra. L'obiettivo della *Terramechanics* é quello di fornire principi guida per lo sviluppo razionale, la progettazione e la valutazione dei veicoli off-road e delle macchine per lavorazione del terreno. Negli ultimi anni, la crescente preoccupazione per il risparmio energetico e la salvaguardia dell'ambiente ha ulteriormente stimolato lo sviluppo di questa materia. Oltre ad avere un buon livello di progettazione in senso tradizionale, una macchina fuoristrada deve raggiungere elevati livelli di efficienza energetica e non causare danni eccessivi all'ambiente in cui opera, quali l'eccessiva compattazione del suolo in agricoltura. L'aumento della attività di esplorazione e sfruttamento delle risorse naturali nelle nuove frontiere, comprese le aree remote e il fondo marino, e la crescente domanda di maggiore mobilità su un'ampia gamma di terreni e in tutte le stagioni, hanno comportato un nuovo impulso allo sviluppo di questa disciplina. Il continuo interesse da parte degli Stati Uniti, dell'Unione europea e della Russia, nonché i programmi avviati dalla Cina, dal Giappone, dall'India e dalle altre nazioni, nell'esplorazione della Luna, di Marte ed oltre, hanno ulteriormente comportato progressi nella *Terramechanics* e nelle sue applicazioni per lo sviluppo di veicoli extraterrestri,

compresi rover con e senza pilota (Wong e Asnani, 2008) .

2.3.1 Ruolo della Terramechanics

Le industrie che producono e utilizzano dispositivi off-road sono imprese con fatturati di miliardi di dollari. Considerando il numero di trattori e attrezzi coltivatrici utilizzati in agricoltura, il numero di macchine movimento terra usati nel settore edile, il numero di camion fuoristrada utilizzati nel settore del trasporto off-road, e il numero di veicoli per il combattimento e per la logistica in operazioni militari, si può apprezzare la portata della disciplina riportata. Questa materia, accoppiata con un approccio di analisi dei sistemi, può svolgere un ruolo significativo nello sviluppo e nella valutazione di attrezzature off-road per una determinata missione. L'analisi dei sistemi è una metodologia che fornisce una valutazione quantitativa e sistematica delle questioni e delle alternative chiaramente definite per chi deve prendere decisioni. La conoscenza della *Terramechanics* può essere applicata, direttamente o indirettamente, allo sviluppo, alla valutazione e alla scelta dei seguenti settori:

- concetti automobilistici e configurazioni, definiti in termini di forma, dimensioni, peso e potenza;
- il sistema di marcia di un veicolo;
- il sistema sterzante di un veicolo;
- il sistema di sospensioni di un veicolo;
- il sistema di trasmissione e distribuzione di energia di un veicolo;
- le prestazioni, la maneggevolezza e la qualità di marcia di un veicolo.

Ci sono molti esempi di applicazioni di successo della disciplina *Terramechanics* e dell'uso dell'analisi dei sistemi come metodologia per lo sviluppo e la valutazione di veicoli off-road . Uno degli esempi più eclatanti è, forse, lo sviluppo del Lunar Roving Vehicle per i programmi Apollo sotto la guida del Dott. MG Bekker (1964, 1967, 1969, 1981). Durante la ricerca della forma ottimale di veicolo per l'esplorazione della superficie lunare, macchine camminanti, veicoli camminanti su vite, e una varietà di veicoli cingolati e su ruote a motore sono stati esaminati in dettaglio (Asnani, Delap e Creager, 2009) . Le loro performance sono state valutate utilizzando i principi della *Terramechanics*. Gli studi approfonditi hanno portato alla selezione di un

veicolo a quattro ruote con un unico tipo di pneumatico tessuto di filo di acciaio e cinto con chevron titanio, come mostrato nella Figura 1.2 (Coward, 1971). Si è riscontrato che questo tipo di pneumatico produce una ottima elasticità, una ottima trazione, resistenza e durata con il minimo peso, ed era compatibile con il vuoto e temperature estreme della luna. Questa configurazione di veicolo si è dimostrata molto efficace sulla superficie lunare .

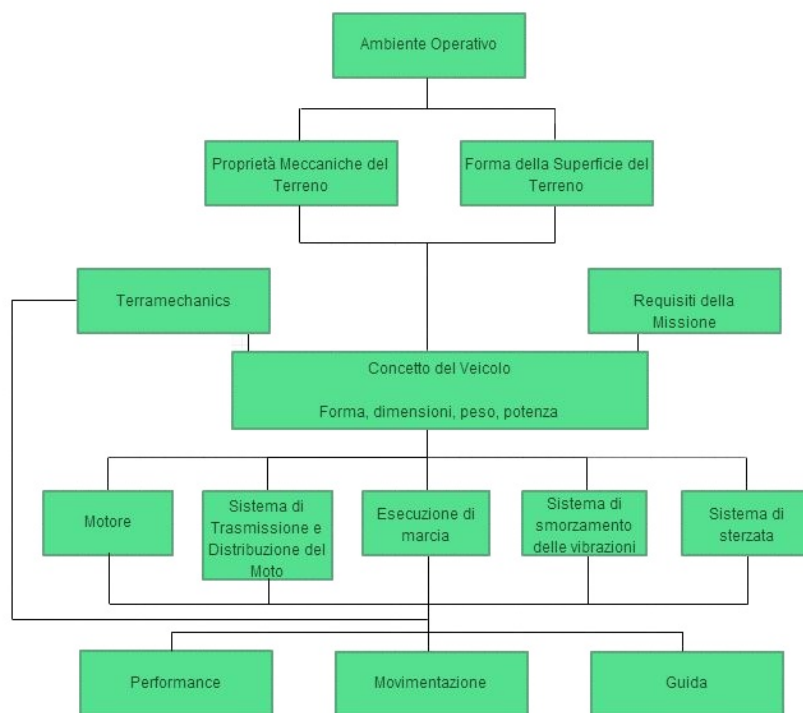


Figura 2.52: Ruolo della Terramechanics

Un altro esempio di applicazione della *Terramechanics* per la valutazione del sistema terreno-veicolo è stato descritto da Sohne (1976) in connessione con gli studi della configurazione ottimale per trattori agricoli. Sulla base dei principi di questa disciplina, Sohne ha effettuato un'analisi delle caratteristiche su forza di trazione-slip e l'efficienza di trazione per cinque configurazioni che vanno dalla trazione posteriore con ruote sterzanti anteriori fino a sei ruote motrici con quattro ruote sterzanti, come mostrato nella Figura 2.54. Sulla base dei risultati delle analisi, è stato effettuato un confronto tra l'effi-

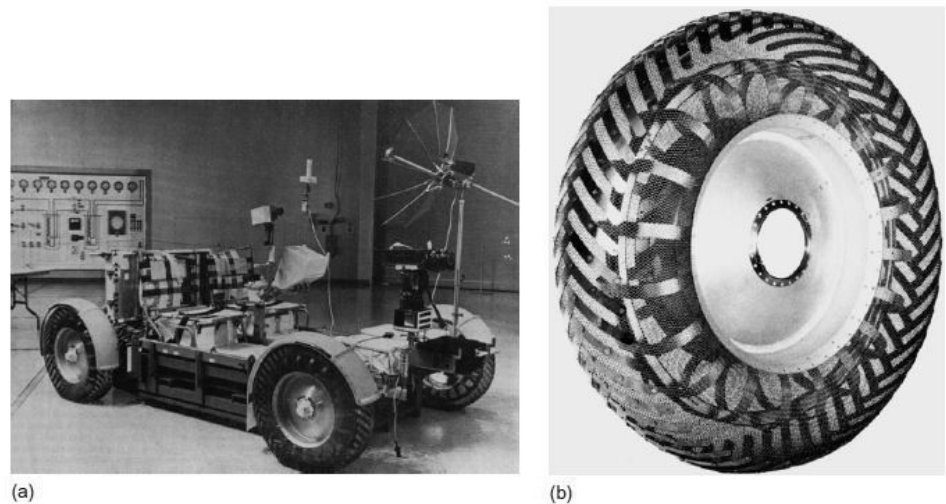


Figura 2.53: (a) Il veicolo Lunar Roving per le missioni Apollo, e (b) pneumatico dal tessuto d'acciaio per il veicolo lunare

cienza tecnica ed economica delle varie configurazioni. Questo tipo di analisi fornisce al progettista informazioni quantitative su cui possono essere prese decisioni razionali. Esempi più recenti dell'applicazione dei principi della *Terramechanics* e della metodologia di analisi dei sistemi per la valutazione parametrica di veicoli cingolati sono stati segnalati da Wong (1992, 1995, 2007, 2008). Utilizzando un metodo computerizzato, noto come NTVPM, la cui validità è stata confermata da dati di test sul campo, gli effetti della progettazione dei veicoli cingolati sulla performance possono essere quantitativamente valutati. La figura 2.55 mostra gli effetti del coefficiente iniziale di tensione del cingolo (ossia il rapporto tra tensione iniziale con il peso del veicolo) sul coefficiente di forza di trazione (cioè il rapporto della forza di trazione rispetto al peso del veicolo) di tre configurazioni del veicolo su neve profonda, (Wong, 2007). Le tre configurazioni del veicolo Veicolo A, veicolo A (6 W) e Veicolo A (8 W) con cinque, sei e otto ruote sovrapposte, rispettivamente, sono mostrati in figura 2.56. Essa dimostra che la tensione iniziale del cingolo ha un effetto significativo sulla mobilità su terra morbida di veicoli cingolati con differenti configurazioni. Questa scoperta ha portato allo sviluppo di un dispositivo innovativo per la regolazione della tensione iniziale del cingolo. Questo dispositivo di controllo a distanza permette al guidatore di aumentare la tensione iniziale del cingolo per il miglioramento

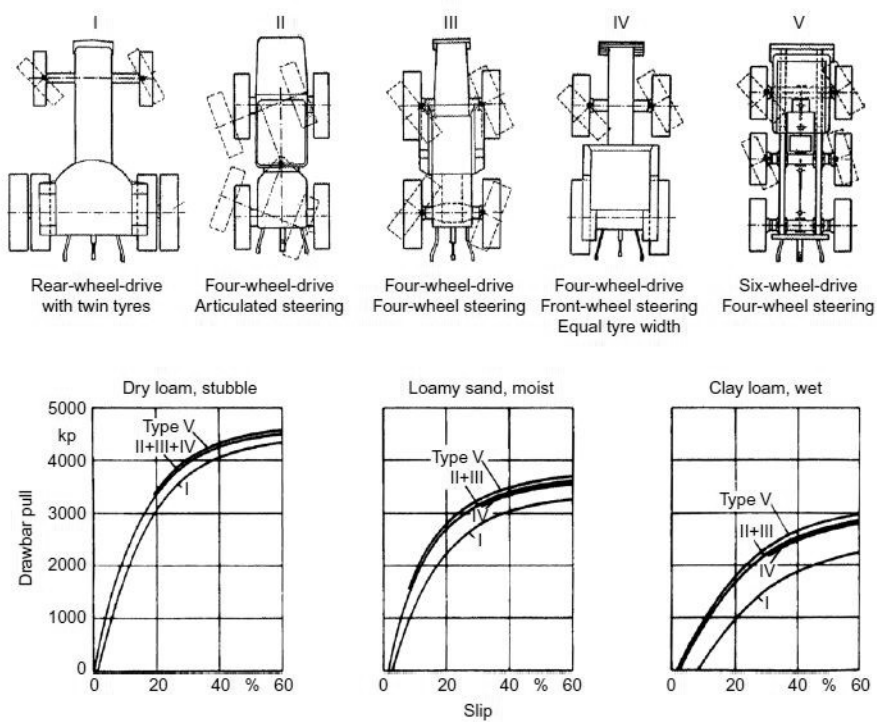


Figura 2.54: Confronto tra diverse configurazioni di trattori agricoli

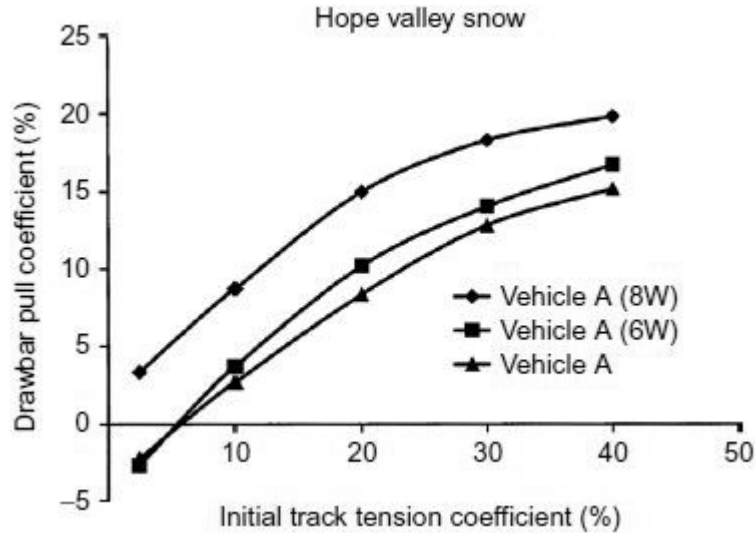


Figura 2.55: Variazioni del coefficiente di forza di trazione al variare del coefficiente di tensione iniziale del cingolo per le tre configurazioni di veicoli con scivolamento al 20%

della mobilità del veicolo su terreno morbido. Questo è analogo al sistema centrale di gonfiaggio dei pneumatici per miglioramento della mobilità del veicolo a ruote. Il sistema di regolazione della tensione del cingolo centrale è stato installato su una nuova generazione di veicoli militari (Wong, 1995). Figura 2.57 (a) e (b) mostra gli effetti della posizione del centro di gravità (CG) e la larghezza del cingolo sul coefficiente forza di trazione del veicolo A, rispettivamente, su Hope Valley neve (Wong, 2007).

2.3.2 Alcune questioni fondamentali sulla Terramechanics

Lo studio delle prestazioni di un veicolo in relazione al suo ambiente operativo, il terreno, è un elemento importante per la *Terramechanics*. Di conseguenza, la modellazione del comportamento del terreno, la misurazione e la caratterizzazione delle proprietà del terreno, l'identificazione dei parametri pertinenti del veicolo che influenzano le prestazioni e la spiegazione dell'interazione tra il veicolo e il terreno sono alcuni dei problemi fondamentali per questa disciplina. Nello studio di questi problemi, si dovrebbe tenere a men-

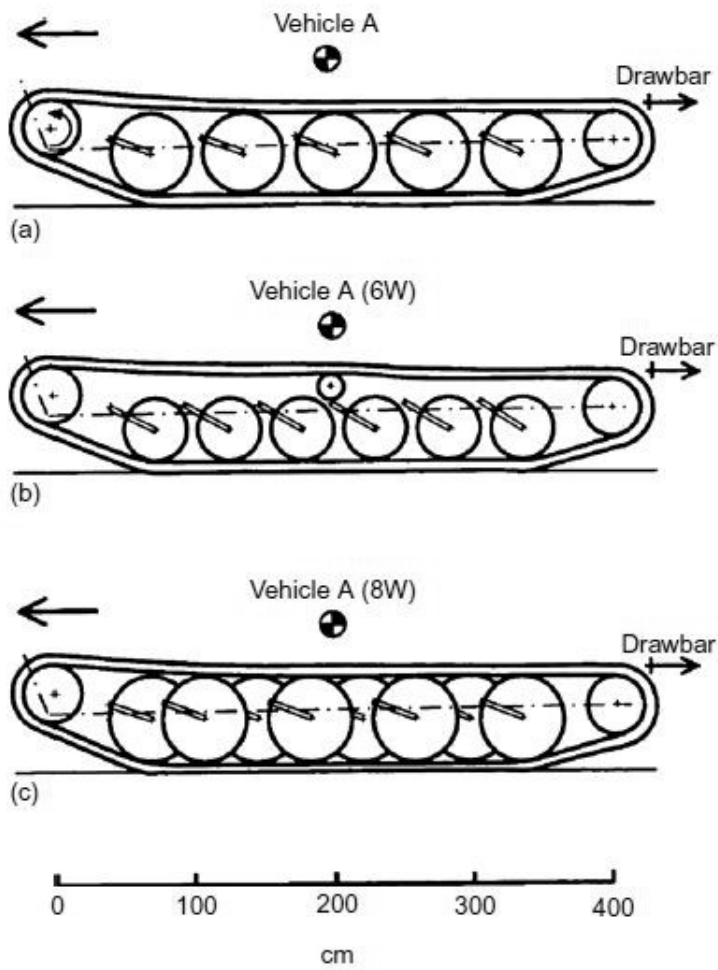


Figura 2.56: Schemi per i sistemi cingolati di (a) Veicolo A, (b) del veicolo A (6 W) e (c) del veicolo A (8 W)

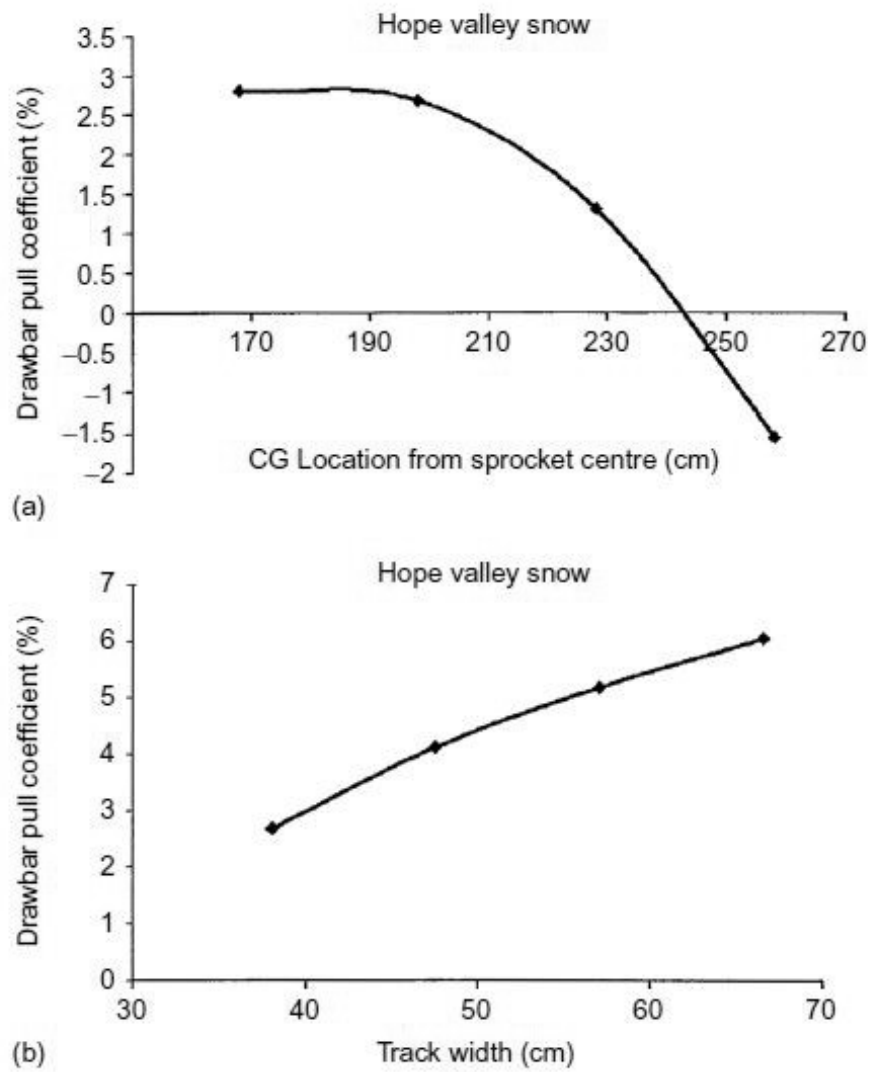


Figura 2.57: (a) variazione del coefficiente di trazione con la posizione longitudinale del baricentro, e (b) variazione del coefficiente di forza di trazione con la larghezza del cingolo per veicolo A

te che l'obiettivo principale è quello di fornire le conoscenze di base su cui possono essere effettuati progressi nella progettazione di veicoli fuoristrada.

2.3.3 Modellazione del comportamento del terreno

Una comprensione del comportamento del terreno sotto un carico veicolare è di importanza strategica. In passato, la modellazione del terreno come un mezzo elastico o come un materiale perfettamente plastico rigido è stata ampiamente utilizzata. La modellazione del terreno, come un mezzo elastico, insieme alla teoria dell'elasticità, ha fornito una base teorica per lo studio di compattazione del suolo. Tuttavia, è applicabile solo per terreni compatti per carichi veicolari non superiori a un determinato livello. La modellazione del terreno, come un materiale perfettamente plastico rigido, insieme con la teoria di equilibrio plastico, ha trovato applicazione per la valutazione della stima della massima trazione per un veicolo fuoristrada, la stima delle forze che agiscono su una lama di bulldozer, o la valutazione della forza di trazione sviluppata da una appendice (o costola) di una ruota. Tuttavia, può essere applicato solo per stimare la massima forza che agisce su un elemento di terreno di impegno che il terreno può supportare, ma non può essere impiegato per prevedere la deformazione del terreno. Con il rapido progresso della tecnologia informatica e tecniche di calcolo in anni recenti, è diventato possibile modellare il terreno mediante gli elementi finiti. Tuttavia, alcuni problemi fondamentali restano da risolvere, come lo sviluppo di un metodo efficace per determinare i valori dei parametri del modello dell'elemento finito per rappresentare correttamente le proprietà del terreno. Inoltre, il metodo degli elementi finiti si sviluppa sulla premessa che il terreno sia un continuum. Di conseguenza, presenta delle limitazioni inerenti alle grandi deformazioni del terreno, che avvengono di solito durante l'interazione del terreno col veicolo fuoristrada. Per studiare l'interazione tra un veicolo e terreno granulare, come sabbia e simili, è stato introdotto il metodo degli elementi discreti. Mentre l'elemento discreto ha alcune caratteristiche uniche, diverse questioni chiave restano da risolvere prima di poter essere generalmente accettato come strumento di progettazione pratico. Questi includono lo sviluppo di un metodo affidabile per determinare i valori dei parametri del modello, per rappresentare realisticamente le proprietà terreno nel settore. Inoltre, sono necessari miglioramenti nella tecnica di calcolo per le simulazioni su vasta scala di interazione veicolo fuoristrada, che richiederebbero milioni di elementi discreti per rappresentare il terreno e tempi lunghi di calcolo anche su supercomputers. In vista delle limitazio-

ni tecniche per modellare il terreno, per studiare la mobilità veicolare nel campo, sono necessarie tecniche pratiche per misurare e caratterizzare le proprietà del terreno.

2.3.4 Misura e caratterizzazione delle proprietà del terreno

Attualmente, la tecnica del cono penetrometro e la tecnica bevameter sono ampiamente utilizzati nella misura delle proprietà meccaniche del terreno per lo studio della mobilità veicolare nel campo. La scelta della tecnica di misurazione delle proprietà del terreno è strettamente legata al metodo di scelta per lo studio dell'interazione veicolo fuoristrada. Per esempio, se il metodo è destinato ad essere utilizzato dal tecnico nello sviluppo e progettazione di nuovi fuoristrada, la tecnica prescelta per misurare e caratterizzare le proprietà del terreno sarà molto diversa da quella destinata ad essere utilizzata dal personale militare per la pianificazione del traffico veicolare cingolato. Attualmente, ci sono due principali tecniche utilizzate per misu-



Figura 2.58: Prova penetrometrica statica con penetrometro semovente

rare e caratterizzare le proprietà del terreno e per valutare la mobilità dei fuoristrada sul campo: la tecnica del penetrometro a cono e la tecnica bevameter. Per esempio, la tecnica del penetrometro è solitamente utilizzato per identificare le condizioni del terreno per lo studio della mobilità del veicolo utilizzando relazioni empiriche. D'altra parte, la tecnica bevameter è utilizzata principalmente nei metodi destinati a dettagliate analisi parametriche di prestazioni del veicolo e del design. Nuove tecniche per misurare le proprietà meccaniche del terreno stanno emergendo, per migliorare la com-

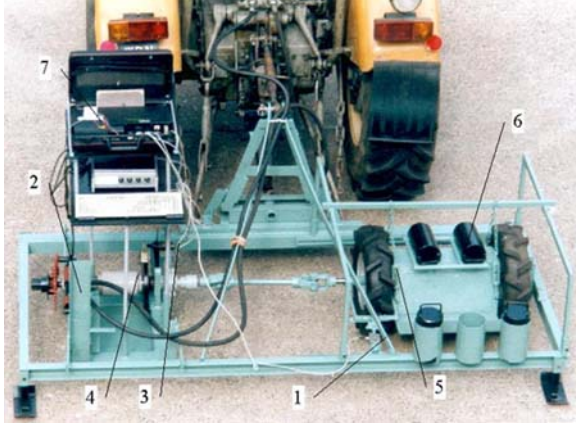


Figura 2.59: Bevameter utilizzato per misurare le proprietà meccaniche del suolo.

preensione della natura fisica dell'interazione veicolo-fuoristrada migliorando ancora di più l'approccio allo studio della mobilità di un veicolo off-road.

Tecnica del penetrometro

Il test di penetrazione a cono (CPT) è un metodo utilizzato in geotecnica per determinare le proprietà dei suoli e delinearne la stratigrafia. È stato inizialmente sviluppato durante la seconda guerra mondiale con l'intento originale di fornire all'intelligence e al personale militare un semplice dispositivo da campo per valutare la mobilità dei veicoli e la trafficabilità del terreno. Oggi, il CPT è uno dei più utilizzati e accettati metodi di indagine per la determinazione delle caratteristiche del terreno in tutto il mondo. Il metodo di prova consiste nello spingere un cono strumentato, con la punta rivolta verso il basso, nel terreno a velocità controllata (1.5-2.5 cm/s). La risoluzione del CPT nel delineare stratigrafie è legato alla dimensione della punta del cono, con punte tipiche del cono aventi una sezione trasversale di 10 o 15 cm^2 , corrispondente al diametro di 3.6 e 4.4 cm. Le prime applicazioni del CPT principalmente determinavano la proprietà geotecniche del terreno di capacità portante. I penetrometri a cono originali venivano utilizzati per semplici misurazioni meccaniche della resistenza totale alla penetrazione di un utensile con una punta conica nel terreno. Diversi metodi sono stati impiegati per separare la resistenza totale misurata in componenti generati dalla punta conica e l'attrito generato dall'asta. Un manicotto per

l'attrito è stato aggiunto per quantificare questa componente di attrito ed ha contribuito nel determinare la forza coesiva del suolo nel 1960. La maggior parte dei moderni coni CPT sono elettronici e sono dotati di un trasduttore di pressione con un filtro per raccogliere i dati. Con il penetrometro, può essere ottenuto un parametro denominato *cone index*. Esso rappresenta la resistenza alla penetrazione nel terreno per unità di superficie di base del cono. L'indice riflette le caratteristiche di taglio e compressione combinati del terreno e l'adesione e attrito all'interfaccia cono-terreno. Tuttavia, i contributi di questi fattori non possono essere facilmente differenziati. L'indice ed il suo gradiente rispetto alla profondità di penetrazione sono stati utilizzati come base di partenza per prevedere le prestazioni fuoristrada su terreno a grana fine (argilla) e su terreno a grana grossa (sabbia), rispettivamente. Mentre l'indice cone index di un terreno può essere ottenuto prontamente, il

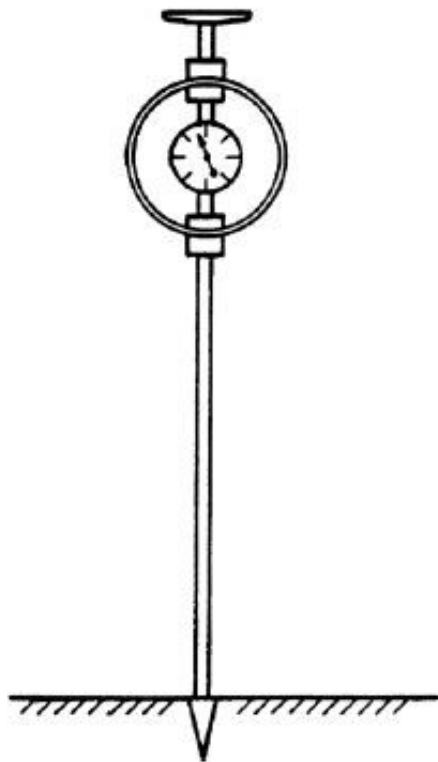


Figura 2.60: Forma base di un penetrometro

problema di se si può usare per identificare adeguatamente le caratteristiche di mobilità di un veicolo su quel terreno o dal punto di vista della trafficabilità del terreno rimane controverso. Per esempio, il lavoro di Reece e Peca (1981) indica che l'indice può essere utile nell'identificare la forza di taglio per della creta priva d'attrito, è inadeguato per caratterizzare le proprietà di una sabbia. Incitato da queste scoperte, Turnage (1984) rianalizzò un numero di dati sperimentali di considerevoli dimensioni di dati sperimentali prima ottenne. Basato sui risultati del suo riesame, Turnage concluse che per realizzare la migliore accuratezza nel predire la performance di un pneumatico in una determinata tipologia di sabbia avente un particolare contenuto di umidità, una fase di test in laboratorio supplementare è strettamente necessaria per definire la relazione tra il gradiente della resistenza alla penetrazione del cono al passaggio del pneumatico e la densità relativa e corrispondente distribuzione degli sforzi. Questo implica che il concetto originale di usare una semplice, singola misurazione mediante un penetrometro a cono per definire le proprietà del suolo a grana grossa deve essere sostituita da una serie di test geotecnici estesi inclusi test in loco, e test di laboratorio.

Tecnica Bevameter

La tecnica bevameter introdotta da Bekker (1956 , 1960 , 1969) si basa sul presupposto che le proprietà del terreno possono essere meglio misurati in condizioni di carico analoghe a quelle esercitate da un veicolo off -road. Un veicolo esercita carichi normali e tangenziali sulla superficie del terreno. Per simulare questi, la tecnica bevameter comprende due serie separate di test. Uno è un test di penetrazione mediante una piastra e l'altra è una prova di taglio . Nel test di penetrazione , la relazione pressione-deformazione del terreno viene misurata utilizzando una piastra di dimensioni adatte per simulare l'area di contatto del rotolamento di un veicolo. Sulla base delle misurazioni, lo sprofondamento del veicolo e la resistenza al movimento possono essere previste. Nella prova di taglio, il rapporto tra spostamento e resistenza al taglio del terreno sono misurati in modo che la trazione massima di un veicolo possa essere stimata. La figura 2.54 mostra un bevameter montato su di un veicolo in funzionamento sul campo. Per agevolare la gestione dei dati, i risultati acquisiti vengono archiviati dal calcolatore di bordo e successivamente elaborati. (Wong, 1980; Wong et al, 1981.). L'uso di un sistema di acquisizione ed elaborazione dati computerizzato non solo riduce notevolmente lo sforzo necessario per ottenere ed elaborare i dati, ma anche

permette di impiegare procedure più razionali per ricavare i valori dei parametri del terreno (Wong, 1980; Wong et al, 1982; Wong e Preston-Thomas, 1983a, b). Per ridurre l'incertezza nell'estrapolare dati del terreno ottenuti sul campo per la predizione delle prestazioni delle macchine, la dimensione delle piastre di prova, utilizzata nelle misure bevameter, deve essere comparabile con la zona di contatto di un pneumatico o quella di una maglia di cingolo.



Figura 2.61: Un bevameter montato su di un veicolo per la misurazione delle proprietà del terreno sul campo

Le tecniche utilizzate in ingegneria civile

In ingegneria civile, le proprietà del suolo sono spesso descritti in termini di resistenza al taglio, modulo di taglio, densità, rapporto di vuoto, ecc. Per misurare questi parametri, campioni di suolo sono di solito presi dal campo e testati in un laboratorio. La resistenza al taglio del terreno viene generalmente misurata utilizzando un apparato triassiale o una scatola di taglio diretto. La misurazione delle caratteristiche del terreno sul campo presenta

alcuni vantaggi rispetto a quelli effettuati in laboratorio. Il vantaggio principale è che le misurazioni vengono effettuate quando il terreno è nel suo stato naturale, eliminando così la possibilità di disturbare i campioni del terreno durante il processo di campionamento per le prove di laboratorio. Inoltre, prove sul campo sono generalmente meno costose e più veloci, specialmente quando si utilizzano sistemi di acquisizione dati portatili.

2.3.5 Modellazione dell'interazione veicolo-terreno

Ci sono due obiettivi primari nello studio dell'interazione veicolo-terreno. Uno è quello di stabilire la relazione funzionale tra le prestazioni di un veicolo off-road e dei suoi parametri di progettazione e le caratteristiche del terreno. Questo consentirà al professionista di prevedere realisticamente le prestazioni del veicolo in condizioni operative diverse. Un metodo accurato per prevedere le prestazioni fuoristrada è di primario interesse per il progettista, nonché per l'utente, di veicoli fuoristrada. L'altro obiettivo è quello di stabilire una procedura con la quale possono essere previsti cambiamenti delle condizioni del terreno causate dal passaggio di un veicolo off-road o macchine per la lavorazione del terreno. Questo è di grande interesse per l'ingegnere agricolo nella valutazione di compattazione del suolo causata da veicoli agricoli e per l'ingegnere civile nella valutazione dell'efficacia dei compattatori e simili. Si può notare che nella maggior parte dei casi l'interazione tra l'elemento macchina e il terreno è molto complessa. Ad esempio, gli schemi di flusso del suolo sotto una ruota dipendono dalla sua cinematica come definito dal suo slittamento, mentre le condizioni di stress all'interfaccia sono determinati dalle condizioni del terreno, e dalla progettazione e dai parametri operativi della ruota, comprese le sue dimensioni e il carico verticale e la coppia applicata ad esso. Dal momento che le prestazioni di un veicolo off-road, definito in termini di resistenza al moto, sforzo di trazione, forza di trazione, l'efficienza di trazione, ecc, è determinato dalle tensioni normali e tangenziali sull'interfaccia veicolo fuoristrada, un tema centrale nella terramechanics è la formulazione di un modello matematico per predire le forze interagenti tra il veicolo e il terreno, sulla base della conoscenza del comportamento del terreno e dei parametri operativi del veicolo. È importante identificazione i parametri di progetto del veicolo che influenzano significativamente la dinamica del veicolo fuoristrada nella formulazione di un modello matematico per prestazioni off-road. Per esempio, diametro del pneumatico, larghezza di sezione, altezza di sezione, angolo dell'aletta e la spaziatura influenzano in modo diverso l'interazione pneumatico-terreno.

Per i veicoli cingolati, parametri di progettazione, come ad esempio il numero di roadwheels, dimensioni roadwheel e spaziatura, la geometria e le dimensioni pista, tensione iniziale pista, caratteristiche di sospensione, e disposizioni per la ruota dentata, folle e rulli di sostegno, hanno un grande effetto sulle prestazioni di trazione.

2.3.6 Approcci alla Terramechanics

Una varietà di metodi di approccio allo studio della mobilità fuoristrada è stata sviluppata negli anni. Si parte da considerazioni molto empiriche a valutazioni analitiche. La selezione del metodo di approccio è molto influenzato dai seguenti fattori.

Scopi previsti

Un metodo destinato ad essere utilizzato nella progettazione e sviluppo di macchine fuoristrada richiede un livello di sofisticazione, di precisione e di dettaglio che differisce sostanzialmente da quello destinato all'uso militare rispetto ad un veicolo destinato ad uso agricolo.

Vincoli ambientali, economici ed operativi

Come in altre branche dell'ingegneria, il metodo di approccio allo studio dell'interazione veicolo-terreno è soggetto a vincoli. Ad esempio, nella selezione delle tecniche per identificare le proprietà meccaniche del terreno in aree remote, sul fondo del mare, o sulla superficie di altri pianeti, vincoli ambientali, economici, operativi e di altro tipo possono essere i fattori più importanti da considerare. Confronto e valutazione dei diversi metodi di approccio alla terramechanics dovrebbero, quindi, essere effettuati nel contesto della loro destinazione e dei fattori limitanti.

2.3.7 Modellazione del terreno

Capire il comportamento del terreno in presenza di un veicolo è di vitale importanza per lo studio delle interazione veicolo-terreno. In questo capitolo, vari approcci per modellare il comportamento del terreno verranno riportati. Nel passato, il terreno veniva modellato come un mezzo elastico o come un materiale rigido e perfettamente plastico. La modellazione del terreno come mezzo elastico, insieme alla teoria dell'elasticità, ha trovato applicazioni nello studio di compattazione del suolo e dei danni al terreno a causa del traffico



Figura 2.62: Rover NASA Mars Exploration

veicolare . La Modellazione del terreno, come materiale perfettamente plastico e rigido invece, insieme con la teoria di equilibrio plastico , ha trovato applicazioni in previsione della trazione massima sviluppata da fuoristrada e della spinta sviluppata dalle alette (costole di aggrappamento) di un cingolo. La modellazione del terreno come un mezzo elastico o come un materiale perfettamente plastico rigido può fornire una base di partenza per chiarire aspetti della natura fisica dell'interazione veicolo-terreno con delle limitazioni. Per esempio, la teoria dell'elasticità può essere applicata soltanto per terreni densi con carico veicolare non superiore ad un certo livello, in modo che il terreno possa essere considerato elastico . D'altra parte, la teoria dell'equilibrio plastico può essere impiegata solo per stimare il carico massimo del veicolo che il terreno può sostenere senza causare il suo schiacciamento, ma non può essere usato per predire l'affondamento del veicolo a causa del suo carico normale o dovuto allo slittamento del veicolo dovuto all'azione di taglio del rodiggio. Per superare le limitazioni della modellazione del terreno, come mezzo elastico o perfettamente plastico, sono stati fatti tentativi per modellare il terreno basato sul concetto della meccanica del suolo dello stato critico, in quanto ha la capacità potenziale per predire sia la sforzo sia la deformazione nel terreno sotto un carico veicolare. Tuttavia, a causa della complessità e la variabilità del comportamento del terreno, finora le applicazioni sullo studio dell'interazione veicolo-terreno sono limitati. Col progresso della tecnologia informatica e delle tecniche computazionali negli ultimi anni, è possibile modellare il terreno con il metodo degli elementi finiti (FEM) o utilizzando il metodo degli elementi discreti (DEM). Questi metodi hanno la capacità potenziale di esaminare alcuni aspetti della natura fisica dell'interazione veicolo-terreno in grande dettaglio. I loro concetti e le loro applicazioni allo studio dell'interazione veicolo-terreno sono descritte in questo capitolo.

2.3.7.1 Modellazione del terreno come un mezzo elastico

Nel caso di terreni densi, come sabbia compatta e simili, il suo comportamento in determinate circostanze può essere paragonata a quella di un mezzo elasto-plastico ideale mediante un rapporto sforzo-deformazione mostrata in figura 2.63. Quando il carico veicolare applicato al terreno non supera un determinato livello e la sollecitazione corrispondente nel mezzo è inferiore a quella indicata da 'A' nella figura, il terreno può mostrare un comportamento elastico. L'idealizzazione del terreno come un mezzo elastico, insieme alla teoria classica di elasticità, è stata impiegata nella previsione di distri-

buzione delle tensioni nel terreno e nella valutazione dell'effetto del traffico veicolare sulla compattazione del suolo o sui danni al terreno. La previsione della distribuzione delle tensioni in un mezzo semi-infinito elastico soggetto a qualunque forma di caricamento sulla sua superficie può essere basato su carichi concentrati. Per un mezzo omogeneo, isotropo ed elastico soggetto ad un carico puntuale sulla superficie, la distribuzione delle tensioni nel terreno può essere previsto utilizzando l'equazione di Boussinesq. L'espressione per la sollecitazione verticale σ_z in un punto del mezzo sotto la superficie definita dalle coordinate mostrate in figura 2.64 è la seguente:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{3W}{2} \pi \left[1 + \left(\frac{r}{z^2} \right)^{5/2} \right] z^2 \\ &= \frac{3W}{2\pi R^2} \left(\frac{z}{R} \right)^3 = \frac{3W}{2\pi R^2} \cos^3 \theta\end{aligned}\quad (2.4)$$

dove $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ e $R = \sqrt{z^2 + r^2}$. Quando le coordinate polari vengono

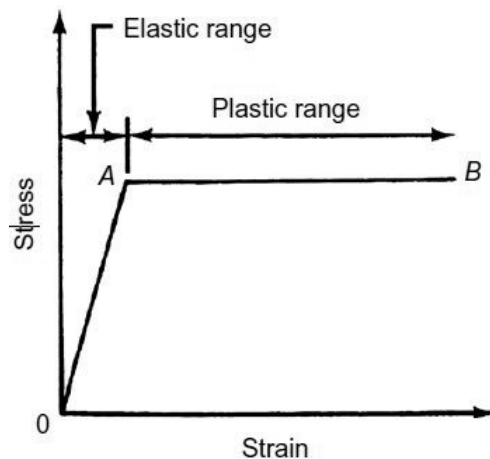


Figura 2.63: Rapporto sforzo-deformazione di un materiale elastoplastico idealizzato

usate, lo stress radiale σ_r (figura 2.64) è definito da

$$\sigma_r = \frac{3W}{2\pi R^2} \cos(\theta) \quad (2.5)$$

Da notare che le tensioni in un mezzo sono indipendenti dal modulo di elasticità di un materiale. Sono solo funzione del carico applicato e della distanza

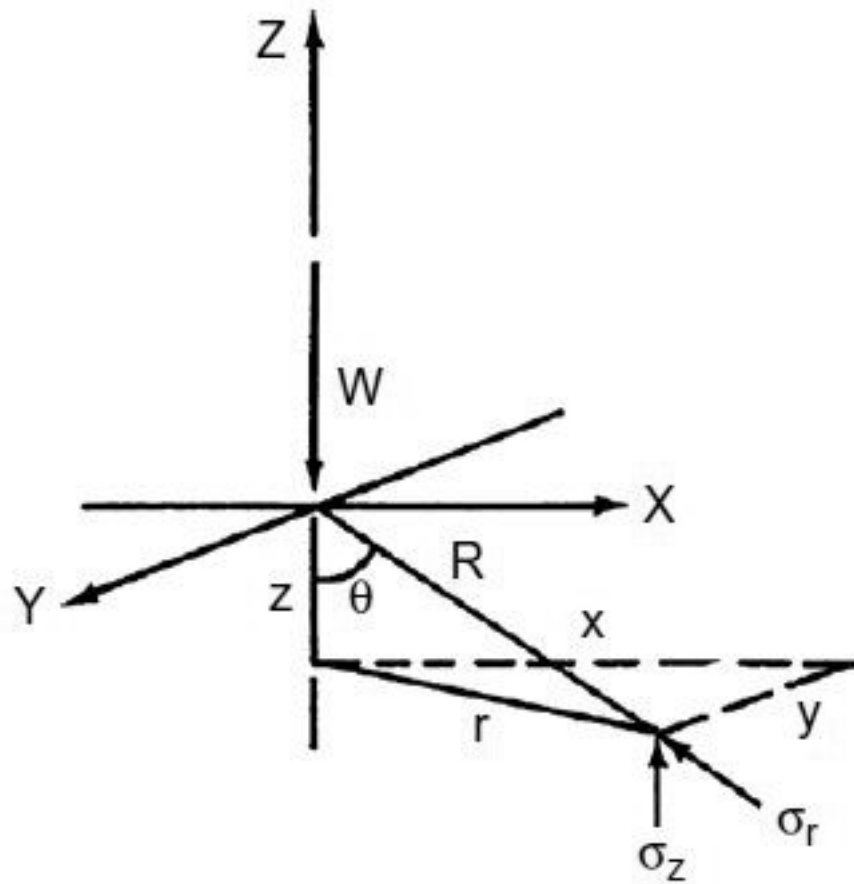


Figura 2.64: Tensioni in un mezzo elastico semi-infinito soggetto ad un carico puntuale sulla superficie

dal punto di applicazione del carico. Ancora bisogna tener presente che le equazioni 2.4 e 2.5 possono essere solo usati per predire gli sforzi in punti non prossimi al punto in cui è applicato il carico. Il materiale in prossimità del punto dove è applicato il carico non presenta comportamenti elastici. Dall'analisi della distribuzione delle tensioni sotto un carico puntuale, la distribuzione delle tensioni in un mezzo elastico sotto una varietà di forme di carico può essere prevista secondo il principio della sovrapposizione degli effetti. Ad esempio, per una zona di carico circolare con raggio r_0 e con pressione di contatto uniforme p_0 (figura 2.65), la tensione verticale ad una profondità z sotto il centro della zona di carico circolare può essere misurato secondo la procedura di seguito riportata (Bekker, 1956; Wong, 2008).

Il carico applicato sulla zona di contatto può essere considerato un assieme di punti di carico discreti, $dW = p_0 dA = p_0 r dr d\theta$. Per cui, in conformità con Eq (??),

$$d\sigma_z = \frac{3p_0 r dr d\theta}{2\pi [1 + (r/z)^2]^{5/2} z^2} \quad (2.6)$$

Lo sforzo verticale risultante σ_z a una profondità z sotto il centro della zona di carico circolare è pari alla somma delle sollecitazioni prodotte da una serie di carichi puntuali rappresentate da $p_0 r dr d\theta$ e può essere calcolato da una doppia integrazione (Bekker, 1956):

$$\sigma_z = \frac{3p_0}{2\pi} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{r dr d\theta}{[1 + (r/z)^2]^{5/2} z^2} = 3p_0 \int_0^{r_0} \frac{r dr}{[1 + (r/z)^2]^{5/2} z^2} \quad (2.7)$$

Sostituendo $(r/z)^2 = u^2$, l'equazione precedente può essere riscritta come segue

$$\sigma_z = 3p_0 \int_0^{r_0/z} \frac{u du}{(1 + u^2)^{5/2}} = p_0 \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r_0^2)^{3/2}} \right] \quad (2.8)$$

Il calcolo delle sollecitazioni in punti diversi da quelli direttamente sotto il centro della zona di carico circolare non può essere espresso con una semplice equazione come Eq (2.8). La distribuzione delle tensioni in un mezzo elastico sotto carichi distribuiti su un'area di forma ellittica o super-ellittica (Hallonborg, 1996), simile a quella della zona di contatto del pneumatico, può essere determinata con metodi numerici seguendo un approccio simile. Un altro caso di interesse dal punto di vista della *terramechanics* è la distribuzione delle tensioni in un mezzo elastico semi-infinito sotto l'azione di un carico distribuito linearmente sulla superficie (figura 2.66). Tale carico può essere considerato come una idealizzazione di quello applicato da un

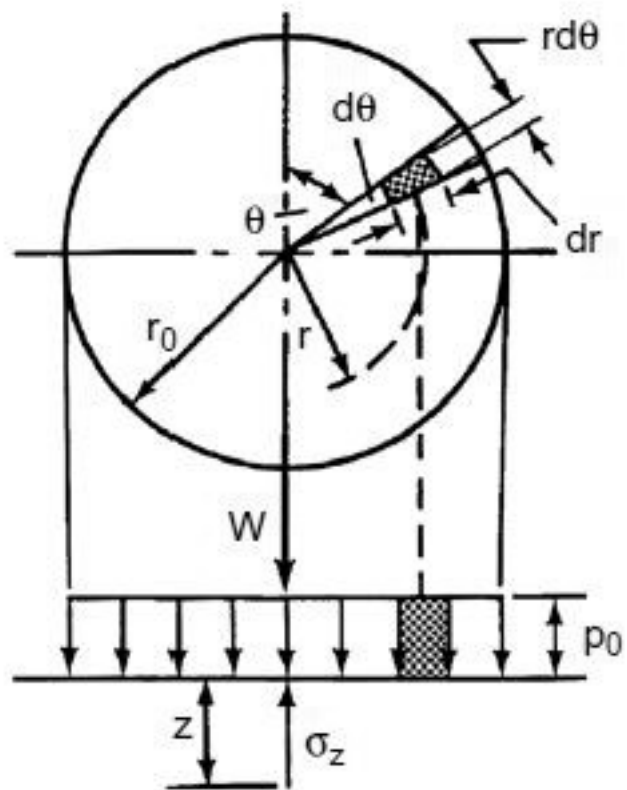


Figura 2.65: Tensioni verticali in un mezzo elastico semi-infinito sotto il centro di una zona di carico circolare (Ristampato per gentile concessione di MG Bekker, Teoria della Locomozione Terrestre, Università del Michigan Press, 1956)

veicolo cingolato , con il cingolo assunto equivalente ad un basamento rigido di pressione normale uniforme. Si può dimostrare che le sollecitazioni nel mezzo elastico a causa della pressione esercitata p_0 uniforme su una striscia di lunghezza infinita e di larghezza costante b (Figura 2.66) possono essere espresse dalle seguenti equazioni (Bekker , 1956) :

$$\sigma_x = \frac{p_0}{\pi}(\theta_2 - \theta_1 + \sin\theta_1 \cos\theta_1 - \sin\theta_2 \cos\theta_2) \quad (2.9)$$

$$\sigma_z = \frac{p_0}{\pi}(\theta_2 - \theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1 + \sin\theta_2 \cos\theta_2) \quad (2.10)$$

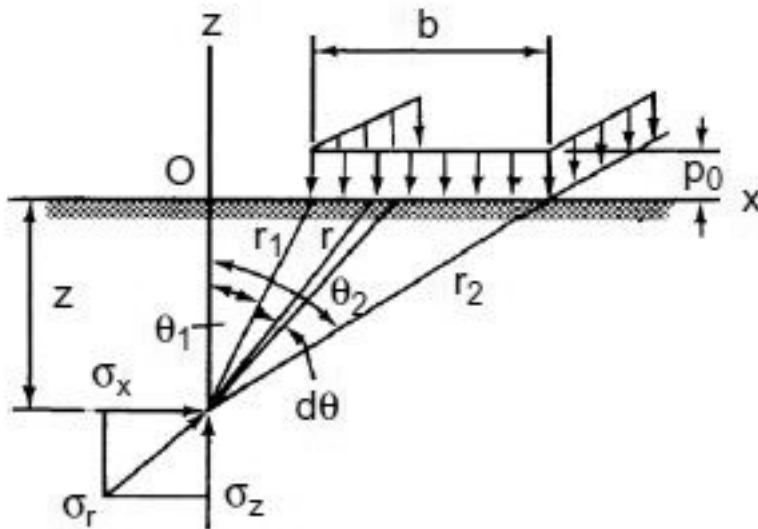


Figura 2.66: Sollecitazioni in un punto in un mezzo elastico semi-infinito sotto un carico a fascia uniforme (Ristampato con il permesso da MG Bekker, Teoria della Locomozione Terrestre, Università del Michigan Press, 1956)

$$\tau_{xz} = \frac{p_0}{\pi}(\sin^2\theta_2 - \sin^2\theta_1) \quad (2.11)$$

I punti nel mezzo che sperimentano lo stesso livello di sollecitazione possono essere descritti in forma di una famiglia di linee isosollecitate (o di superfici), comunemente indicate come bulbi di pressione. Le caratteristiche generali dei bulbi di sforzo verticale sotto un veicolo con due cingoli, idealizzata con due plinti rigidi, sono illustrati in Figura 2.67. E' interessante notare che ad

una profondità pari alla larghezza della pista, la sollecitazione verticale sotto il centro della zona di carico è circa il 50% della pressione p_0 esercitata sulla superficie della pista. Diminuisce ad una profondità pari al doppio della larghezza della pista. I confini dei bulbi di pressione verticali possono essere considerati inclinati di un angolo di 45° con l'orizzontale come mostrato in Figura 2.67 (Bekker, 1956). Va sottolineato che modellando il terreno come un mezzo elastico e applicando la teoria dell'elasticità per prevedere la distribuzione delle tensioni nel terreno si producono solo risultati approssimativi. Alcune misurazioni hanno mostrato che la distribuzione delle tensioni nel terreno si discosta da quelle previste utilizzando l'equazione di Boussinesq, dipendente dalle condizioni del terreno (Sohne, 1958). Vi è una tendenza per le sollecitazioni nel terreno di concentrarsi attorno all'asse centrale della zona di carico: diventa maggiore, in quanto il contenuto di umidità del terreno aumenta. Sulla base di queste osservazioni, i vari fattori semi-empirici (o parametri) sono state introdotte all'equazione di Boussinesq, per spiegare il comportamento dei diversi tipi di terreno. Per esempio, Frohlich ha introdotto un fattore di concentrazione v all'equazione Boussinesq. Con l'introduzione del fattore v di concentrazione, le espressioni per le sollecitazioni verticali e radiali nel terreno a causa di un carico concentrato applicato sulla superficie di assumere le seguenti forme:

$$\sigma_z = \frac{vW}{2\pi R^2} \cos^v \theta = \frac{vW}{2\pi z^2} \cos^{v+2} \theta \quad (2.12)$$

$$\sigma_r = \frac{vW}{2\pi R^2} \cos^{v-2} \theta = \frac{vW}{2\pi z^2} \cos^v \theta \quad (2.13)$$

Il valore di v dipende dal tipo di terreno e dal suo contenuto di umidità. Ad esempio, nel caso di terreno duro e asciutto, il valore di v è 4; per terreno agricolo avente densità e contenuto di umidità normale, il valore di v è 5, e per il suolo bagnato, il valore di v può essere 6 (Sohne, 1958). Se il terreno è perfettamente elastico, il valore di v è 3. In questo caso, le eq (2.12) e (2.13) sono identici alle equazioni 2.4 e (2.5), rispettivamente. La figura 2.68 mostra la distribuzione delle sollecitazioni radiali σ_r nel terreno con differenti valori del fattore di concentrazione v sotto un carico concentrato applicato sulla superficie. Si può notare che quando il valore di v è 4, le linee di sollecitazione radiale uguale (o bulbi di sollecitazione) sono approssimativamente circolari. Come il valore di v aumenta, la forma dei bulbi di pressione diventa più stretta ed i bulbi di pressione penetrano più in profondità nel terreno. In pratica, un pneumatico applica un carico alla

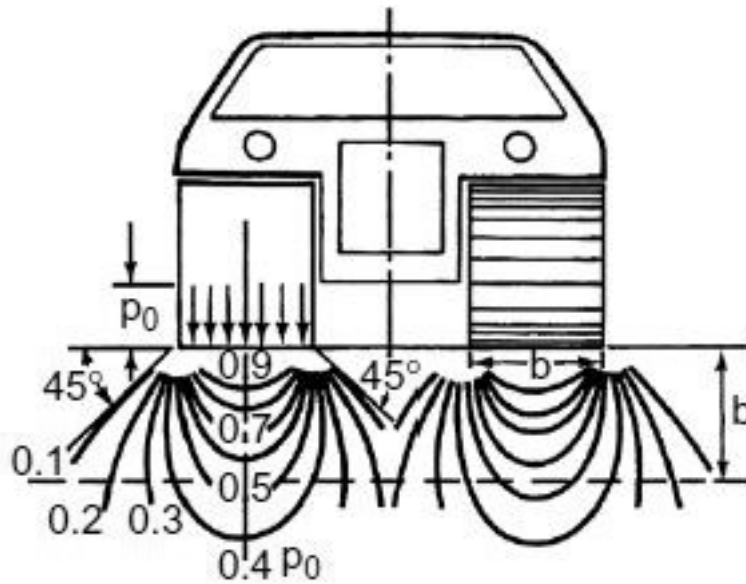


Figura 2.67: Distribuzione delle tensioni verticali in un mezzo elastico semi-infinito sotto un veicolo cingolato, (Ristampato con permesso da MG Bekker, Teoria di locomozione terrestre, University of Michigan Press, 1956)

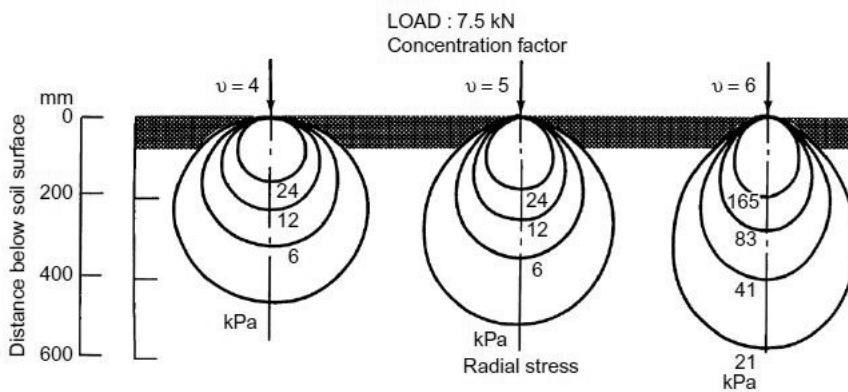


Figura 2.68: Distribuzione delle tensioni radiali sotto un carico concentrato in terreni con diversa concentrazione fattori (Ristampato con il permesso di ASABE da Sohne, 1958)

superficie del terreno attraverso una zona di contatto definita piuttosto che un punto. Per determinare la distribuzione delle tensioni nel terreno a causa del carico del pneumatico, la forma e la dimensione dell'area di contatto e la distribuzione della pressione su zona di contatto devono essere noti. La figura 2.69 mostra le aree di contatto misurate di un pneumatico in diverse condizioni del terreno (Sohne, 1958). La forma delle zone di contatto indicate in figura può essere descritte come la combinazione di due super ellissi di diverse forme (Hallonborg, 1996). Per esempio, nel primo quadrante mostrato in Figura 2.70, dove $0 < x < a_1$, la forma della curva può essere descritto da

$$y = b \left(1 - \frac{x^n}{a_1^n} \right)^{1/n} \quad (2.14)$$

Nel secondo quadrante, dove $-a_2 < x < 0$, la forma della curva può essere descritta da

$$y = b \left(1 - \frac{x^m}{a_2^m} \right)^{1/m} \quad (2.15)$$

dove a_1 e a_2 sono gli assi delle super ellissi lungo la direzione x nel primo e secondo quadrante, rispettivamente; gli assi delle due super ellissi nella direzione y devono avere lo stesso valore di b , al fine di garantire la continuità delle due curve a $x = 0$. Come indicato nelle eq (2.14) e (2.15), gli esponenti delle due curve n ed m possono essere diversi. Le corrispondenti curve sotto l'asse x , con la y negativa, sono le immagini speculari di quelle sopra l'asse x . Le aree di contatto del pneumatico con aree che vanno dagli 819 ai 1135 cm^2 mostrati in figura 2.69 possono essere approssimati dalla combinazione di due super ellissi con i valori degli esponenti m ed n mostrati in figura 2.71 (Hallonborg, 1996). Le corrispondenti aree totali della combinazione di due super ellissi sono anche specificati nella figura. Si può notare che le super ellissi forniscono una ragionevole rappresentazione della forma delle aree di contatto dei pneumatici mostrate in figura 2.69. Rispetto alla pressione sulla superficie di contatto di un pneumatico senza alette, una pressione sostanzialmente uniforme su tutta la superficie di contatto può essere assunta nel caso di terreno asciutto. Su terreni teneri, la pressione sulla zona di contatto varia con la profondità del solco. Esso generalmente diminuisce verso il confine dell'area di contatto ed è più concentrata al centro dell'area di contatto. Distribuzioni di pressione rappresentativi sulla superficie di contatto di un pneumatico senza alette su terreno duro, asciutto, abbastanza umido, terreno relativamente denso, e terreno bagnato sono illustrati nella figura 2.72 (Sohne, 1958). Quando la forma e le dimensioni della zona di contatto

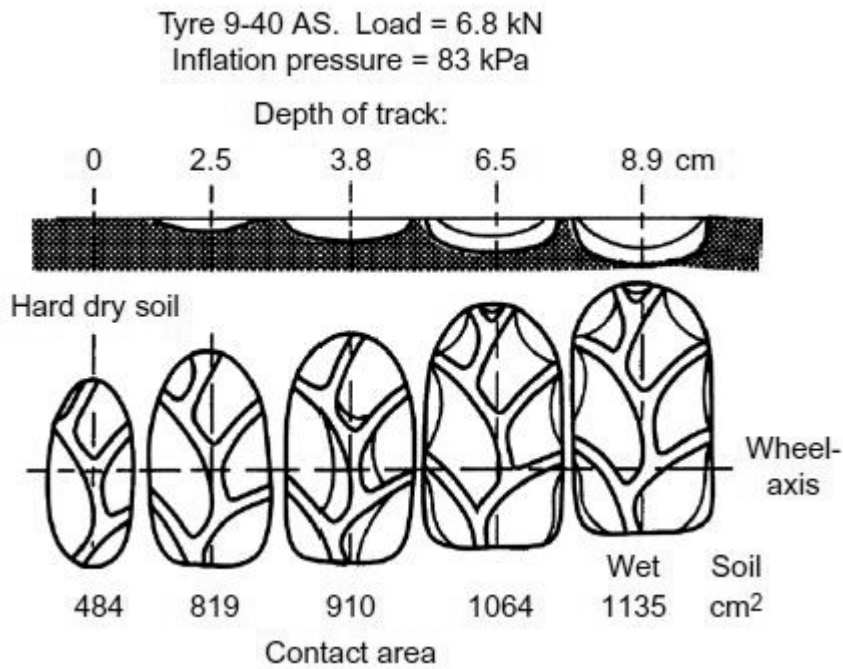


Figura 2.69: Aree di contatto di un pneumatico per condizioni differenti del suolo

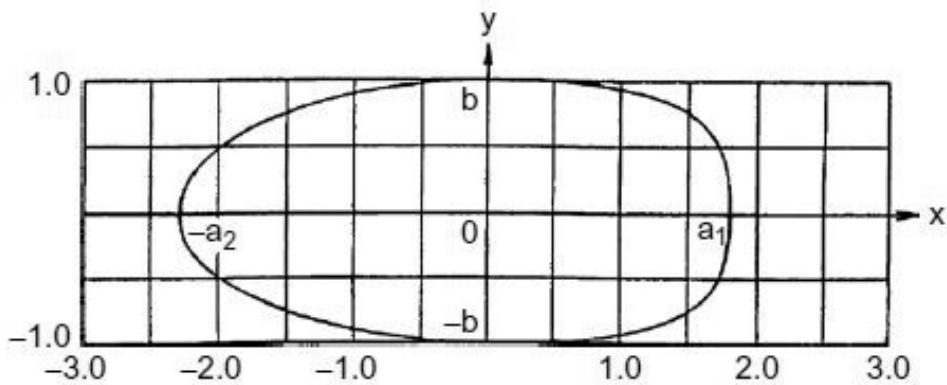


Figura 2.70: Forma della zona di contatto di un pneumatico rappresentato con parti di due super ellissi

del pneumatico e la distribuzione di pressione su di esso sono noti, è possibile prevedere la distribuzione di pressione nel terreno con un dato fattore di concentrazione, seguendo la procedura sopra descritta. La figura 2.73 mostra le distribuzioni delle sollecitazioni principali sotto un pneumatico su terreni vari con differenti valori del fattore di concentrazione v .

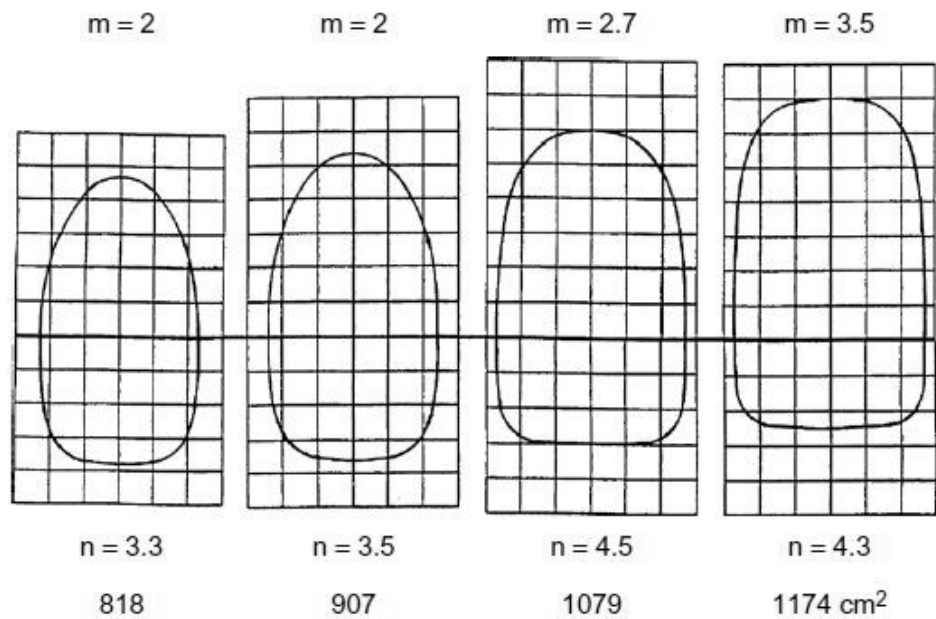


Figura 2.71: Aree di contattato di un pneumatico per differenti condizioni del suolo rappresentate da parti di super-ellissi

2.3.7.2 Modellazione del terreno come un mezzo plastico

Quando il carico applicato alla superficie del terreno supera un certo valore, il livello di sollecitazione entro un certo limite del terreno raggiunge quella indicata da A sulla relazione idealizzata sollecitazione-deformazione mostrata in figura 2.63. Un infinitamente piccolo aumento delle sollecitazioni oltre il punto A produce un rapido aumento della deformazione, che costituisce flusso plastico. Lo stato che precede il flusso plastico è di solito indicato come equilibrio plastico. La transizione dallo stato di equilibrio plastico a quello di flusso plastico rappresenta il cedimento del terreno (Wong, 2008). Un certo numero di criteri sono stati proposti o sviluppati per definire il

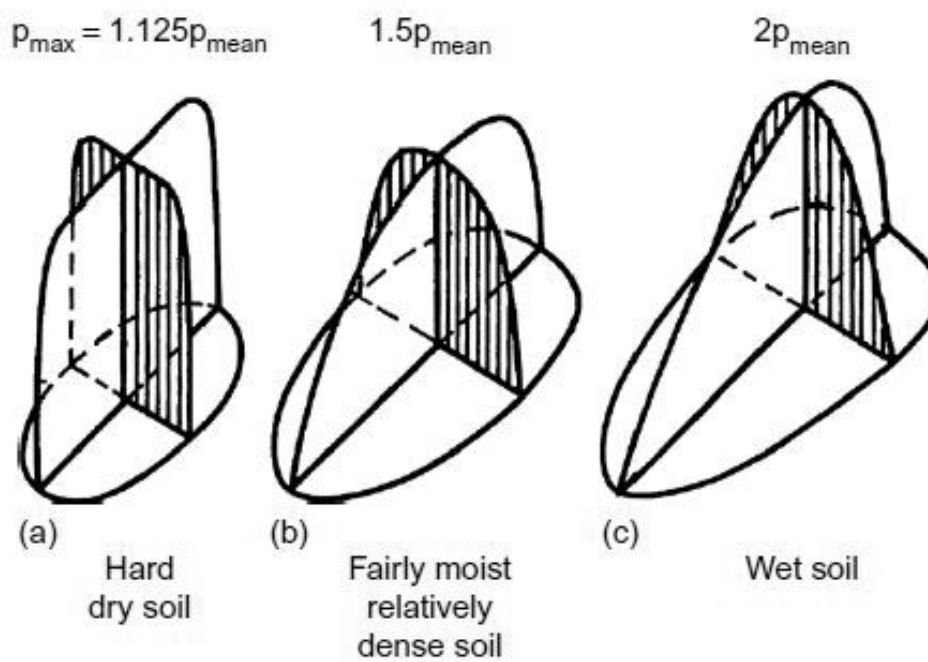


Figura 2.72: Distribuzioni di pressione sulla superficie di contatto dei pneumatici per le diverse condizioni del terreno

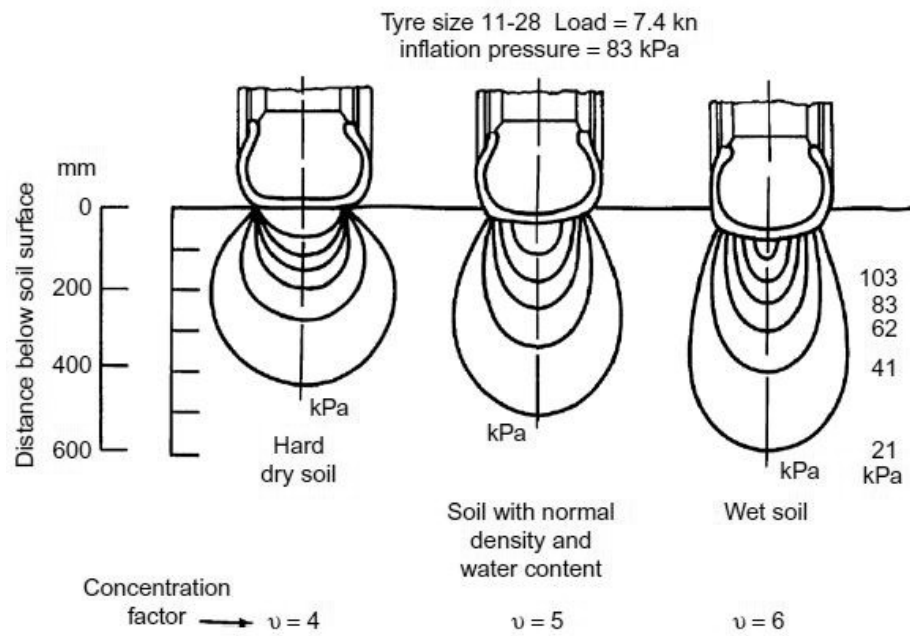


Figura 2.73: Distribuzioni delle maggiori tensioni principali sotto un pneumatico per diverse condizioni del suolo

cedimento di suoli o altri tipi di terreno. Tra questi, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb è uno dei più utilizzati. Si postula che il materiale ad un certo punto viene meno se la tensione tangenziale in quel punto soddisfa la seguente condizione:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.16)$$

dove τ è lo sforzo di taglio, c è la coesione, σ è la tensione normale sulla superficie di taglio, e ϕ è l'angolo di resistenza al taglio interno del materiale. La coesione è il legame che cementa particelle del materiale insieme, indipendentemente dalla pressione normale tra le particelle. D'altra parte, le particelle di materiale frizionale possono essere tenute insieme solo quando una pressione normale è presente tra di loro. Così, la resistenza al taglio dell'argilla satura e simili, non dipende dalla pressione normale, mentre la resistenza a taglio di sabbia asciutta o materiali simili aumenta con un aumento della pressione normale. Per l'argilla satura, la sua resistenza al taglio è data da

$$\tau = c \quad (2.17)$$

e per la sabbia asciutta, la sua resistenza al taglio è espressa da

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2.18)$$

I terreni che coprono la maggior parte della superficie terrestre carrabile, generalmente hanno sia proprietà di coesione sia di attrito e di resistenza al taglio come descritto dalla eq 2.16. Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb implica semplicemente che se un cerchio di Mohr che rappresenta lo stato di sollecitazione in un punto del terreno tocca la linea avvolgente, la rottura avrà luogo in quel punto. I parametri di resistenza al taglio C e ϕ in eq (2.16) possono essere misurati da una varietà di dispositivi. L'apparato triassiale e la scatola di taglio traslazionale sono comunemente utilizzati negli studi di Soil Mechanics relativi all'ingegneria civile. Per il campo della terramechanics, tuttavia, piastre di contenimento rettangolari o anulari sono generalmente impiegate. La misurazione e la caratterizzazione del comportamento di tranciatura di vari tipi di terreno sono discussi nel Capitolo 5. La spinta (sforzo di trazione) di un veicolo di rotolamento, ad esempio una gomma o un cingolo, si sviluppa attraverso la sua azione di taglio sulla superficie del terreno, come mostrato nella figura 2.75. L'equazione (2.16) può essere applicato per stimare la spinta massima che può essere sviluppata da un veicolo in marcia (Micklethwaite, 1944). Ad esempio, se l'area di contatto di un pneumatico o di un cingolo sono noti e la pressione sulla superficie di

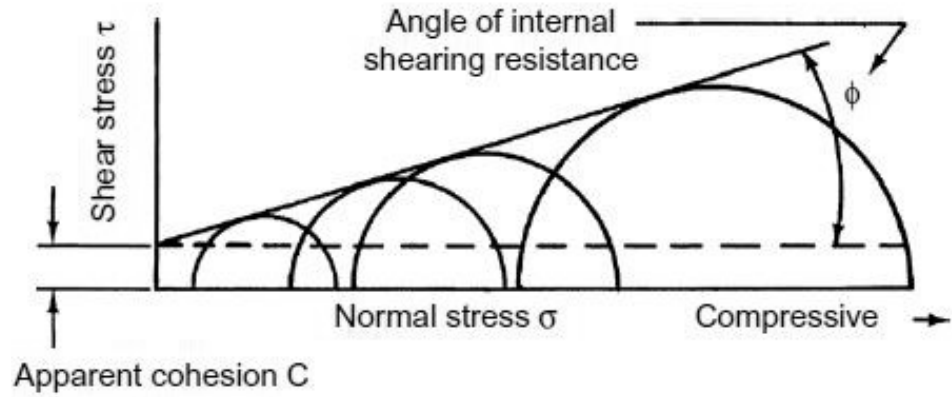


Figura 2.74: Criterio di rottura di Mohr-Coulomb

contatto è uniforme, allora la sua massima spinta può semplicemente essere prevista dalla seguente equazione:

$$F_{max} = \tau A = (c + \sigma \tan \phi) A = cA + W \tan \phi \quad (2.19)$$

dove A è l'area di contatto di un pneumatico o di un cingolo; il prodotto della pressione di contatto per la superficie di contatto è pari al carico normale sul pneumatico o sul cingolo W . L'equazione (2.19) indica che su un terreno ad elevata rugosità, come la sabbia secca del deserto e simili, la spinta massima di un veicolo in marcia dipende dal suo carico normale e dall'angolo di resistenza al taglio interno del terreno. Esso è indipendente dalla sua area di contatto. Così, sulla sabbia secca del deserto e simili, la spinta massima sviluppata da un veicolo è espresso da

$$F_{max} = W \tan \phi \quad (2.20)$$

L'equazione (2.20) indica che su un terreno con attrito, maggiore è il carico normale, maggiore è la spinta massima di un veicolo in marcia che può essere sviluppata. Su un terreno coeso, come l'argilla satura e simili, la spinta massima di un veicolo in marcia dipende dalla sua superficie di contatto e la coesione del terreno. Esso è indipendente rispetto al suo carico normale. Così, su argilla satura e simili, la spinta massima di un veicolo in marcia è data da

$$F_{max} = cA \quad (2.21)$$

L'equazione (2.21) implica che su un terreno coeso, maggiore è l'area di contatto, maggiore è la spinta di un veicolo in marcia che può essere sviluppata. Un altro esempio di applicazione del criterio di rottura di Mohr-Coulomb

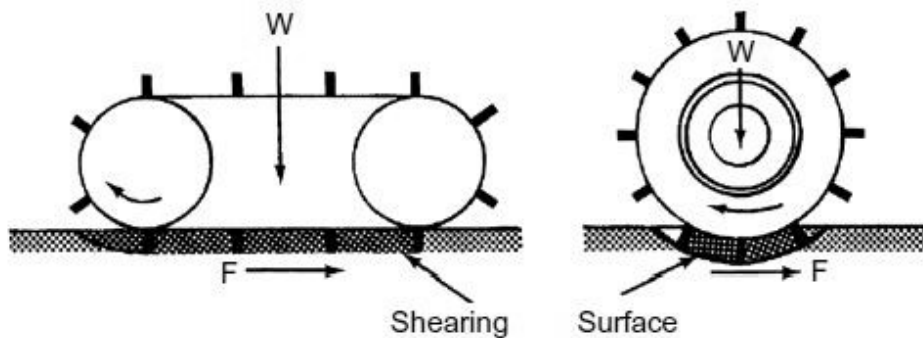


Figura 2.75: Azione di taglio di un cingolo e di una ruota

può essere illustrata esaminando l'equilibrio plastico di un prisma in una porzione di terreno semi-infinito mostrato in figura 2.76. Il prisma di terreno avente densità γ_s , avente profondità z e larghezza pari all'unità è in uno stato di rottura incipiente plastica a causa della pressione laterale. Non esistono sollecitazioni di taglio sui lati verticali del prisma; lo sforzo normale sulla base del prisma e lo sforzo sui lati verticali sono pertanto le tensioni principali. Il prisma può essere portato ad uno stato di equilibrio plastico da due operazioni differenti: uno è quello di allungarlo e l'altro è quello di comprimerlo in direzione orizzontale. Se il prisma viene allungato, lo sforzo normale su entrambi i lati verticali diminuisce fino a quando le condizioni di equilibrio plastico sono soddisfatte, mentre lo sforzo normale al fondo rimane invariato. Qualsiasi ulteriore espansione semplicemente provoca un flusso plastico. In questo caso, il peso della massa di terreno assiste nella espansione e questo tipo di rottura viene definito rottura attiva. D'altra parte, se il prisma è compresso, lo sforzo normale su entrambi i lati verticali aumenta, mentre quello in basso rimane invariato. In questo caso, la compressione laterale del terreno si oppone al peso proprio e la rottura risultante è chiamata rottura passiva. I due stati di sollecitazioni, prima di flusso plastico causati da espansione e poi dalla compressione del suolo sono generalmente indicate come stato attivo e passivo di Rankine, rispettivamente. Nella maggior parte dei problemi in terramechanics bisogna considerare la rottura passiva. L'applicazione del criterio di rottura di Mohr-Coulomb

per l'analisi di rottura passiva è presentata di seguito . Come la rottura

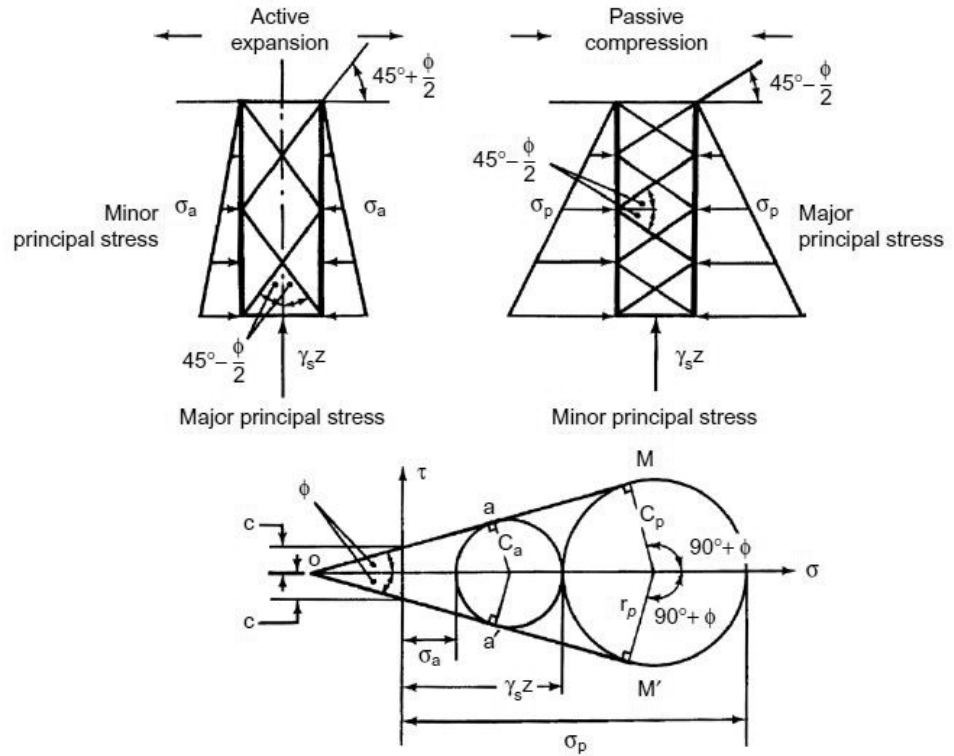


Figura 2.76: Rottura attiva e passiva del suolo

passiva è causata dalla compressione laterale, lo sforzo normale che agisce sul fondo di un elemento di terreno è uguale a $\gamma_s z$ ed è lo sforzo minore principale, come mostrato nella figura 2.76. Il cerchio C_p nella figura rappresenta lo stato di sollecitazioni di un elemento a rottura passiva incipiente. Il punto di intersezione tra il cerchio C_p e l'asse orizzontale del grafico di Mohr determina la maggiore sollecitazione principale, che è la sollecitazione di compressione laterale su entrambi i lati verticali necessari per portare l'elemento in rottura passiva. Questo sforzo normale viene indicato come la pressione passiva della terra σ_p . Dai rapporti geometriche mostrate nella figura 2.76, l'espressione per la pressione della terra passiva σ_p è data da

$$\sigma_p = \gamma_s z + 2r_p \tag{2.22}$$

dove r_p è il raggio del cerchio C_p ed è espressa da

$$r_p = \frac{c \cos \phi + \gamma_s z \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.23)$$

Per cui,

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \gamma_s z \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2c \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} = \gamma_s z \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) \\ &= \gamma_s z N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \end{aligned} \quad (2.24)$$

dove $N_\phi = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ e viene chiamato valore di flusso. Per rotture passive, visto che le maggiori sollecitazioni principali σ_p sono orizzontali, le linee di scorrimento (o superfici di scorrimento) su cui la rottura si svolge (o su cui la sollecitazione di taglio τ soddisfa il criterio di rottura di Mohr-Coulomb) sono inclinate di un angolo di $(45^\circ - \phi/2)$ con l'orizzontale, come mostrato in figura 2.76. Se la pressione q è applicata alla superficie del terreno, che viene solitamente indicato come il supplemento, allora la tensione normale alla base dell'elemento in profondità z è

$$\sigma = \gamma_s z + q \quad (2.25)$$

Conseguentemente, la pressione passiva della terra σ_p è data da

$$\sigma_p = \gamma_s z N_\phi + q N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (2.26)$$

2.4 Dinamica e Cinematica di Veicoli Off-Road

Con prestazioni di un veicolo off-road ci si riferisce alla sua capacità di superare la resistenza del movimento, per sviluppare la forza di trazione, di scalare pendii, o di accelerare in moto rettilineo. Dipende dall'uso previsto, criteri differenti vengono impiegati per valutare le prestazioni dei vari tipi di fuoristrada. Per i trattori e simili, la loro funzione principale è quella di fornire una adeguata forza motrice in modo da tirare (o spingere) macchine operatrici come aratri o lame di bulldozer. Essa può essere caratterizzata dal rapporto della forza di trazione con il peso del trattore, potenza di traino (prodotto della forza di trazione e la velocità di avanzamento del veicolo) e di efficienza della trazione (il rapporto tra potenza di traino per l'ingresso di potenza corrispondente). Per i veicoli di trasporto off-road, come i camion

usati in miniera, il tasso di tempo di trasporto del carico utile da origine a destinazione è importante. Esso può essere caratterizzato dalla produttività del trasporto (il prodotto del payload e la velocità media di funzionamento del veicolo da origine a destinazione) e l'efficienza di trasporto (il rapporto di produttività del trasporto all'ingresso di alimentazione corrispondente) . Per i veicoli militari , la velocità massima possibile tra due punti specifici di un determinato teatro operativo può essere impiegato come criterio importante per valutare le loro prestazioni . In questo capitolo vengono discussi i criteri di prestazione per i vari tipi di veicoli off-road

2.4.1 Fattori che influiscono sulla dinamica dei veicoli Off-road

Le principali forze esterne che agiscono su di un veicolo cingolato e su un fuoristrada sono mostrate in figura 2.77 (a) e (b), rispettivamente. Nella direzione longitudinale, troviamo la resistenza aerodinamica (drag) R_a , la resistenza al moto del veicolo R_v (nel caso di un veicolo a più ruote come mostrato in figura 2.77 (b), è la somma delle resistenze al movimento che agiscono sulle ruote anteriori e posteriori, $R_v = R_{vf} + R_{vr}$), la spinta (forza di trazione o forza propulsiva) F (nel caso di veicolo a due assi, quattro ruote motrici fuoristrada, è dato dalla somma delle spinte sviluppate dalle ruote anteriori e posteriori, $F = F_f + F_r$), e la forza di trazione F_d . Se il veicolo opera su un pendio con angolo θ_s rispetto all'orizzontale, l'equazione del moto lungo la direzione longitudinale (o asse x) è espresso da

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{W}{g} a = F - R_a - R_v - F_d \mp W \sin \theta_s = F - R_a - R_v - F_d \mp R_g \quad (2.27)$$

dove m e W sono massa e peso del veicolo, rispettivamente, d^2x/dt^2 oppure a è l'accelerazione lineare del centro di massa lungo la direzione longitudinale, e g è l'accelerazione di gravità, $W \sin \theta_s$ o R_g è il grado di resistenza. Quando il veicolo si arrampica su di un pendio, è usato il segno negativo per $W \sin \theta_s$ o R_g in eq (2.27), e quando si corre lungo un pendio, viene utilizzato il segno positivo. Introducendo il concetto di forza di inerzia, la eq (2.27) può essere riscritta come

$$F = (aW/g) + R_a + R_v + F_d \pm R_g \quad (2.28)$$

In condizioni di stato stazionario, la forza di inerzia (aW/g) è pari a zero e la eq 2.28 si semplifica in

$$F = R_a + R_v + F_d \pm R_g \quad (2.29)$$

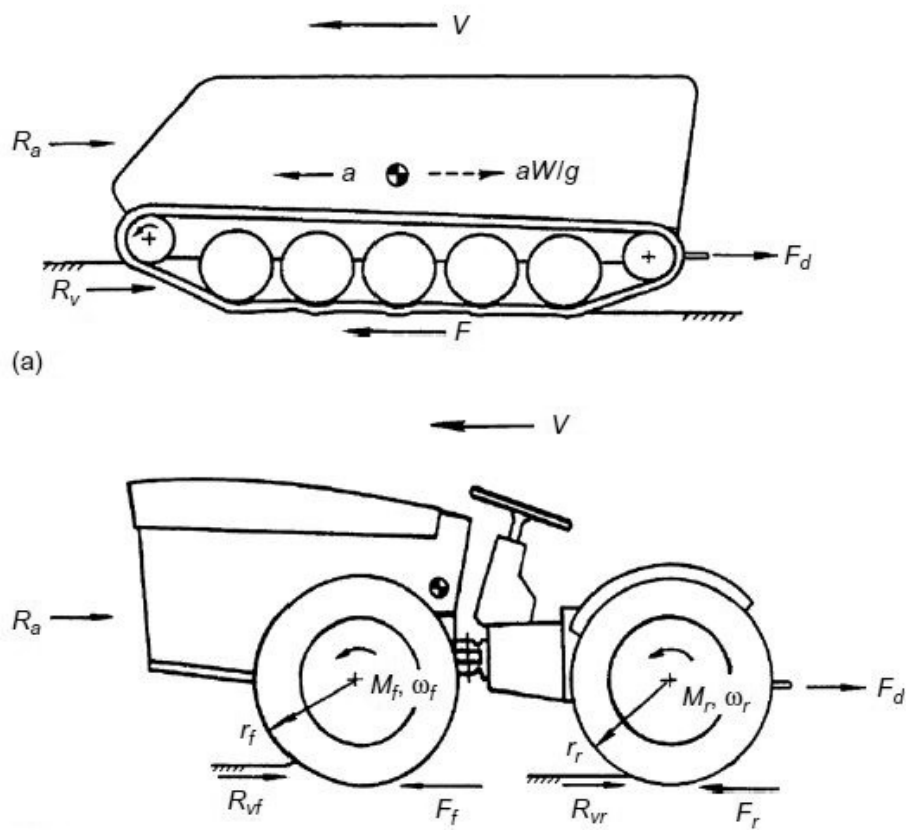


Figura 2.77: Principali forze esterne che agiscono su (a) un veicolo cingolato e (b) un veicolo a ruote

2.4.1.1 Resistenza aerodinamica

La resistenza aerodinamica R_a è generalmente espressa nella forma seguente:

$$R_a = \frac{\rho}{2} C_D A_f V_r^2 \quad (2.30)$$

dove ρ è la densità della massa dell'aria, C_D è il coefficiente adimensionale della resistenza aerodinamica (drag) e dipende principalmente dalla forma del veicolo, A_f è l'area frontale del veicolo, e V_r è la velocità del veicolo rispetto alla velocità del vento. La resistenza aerodinamica non è solitamente un fattore importante sull'influenza delle prestazioni dei veicoli fuoristrada che operano a velocità inferiori ai 48 chilometri all'ora. Per i veicoli progettati per le operazioni a velocità più elevate, come nel caso di veicoli militari da combattimento, può essere presa in considerazione nella valutazione delle prestazioni. Per i veicoli da combattimento pesanti, quali i carri armati, il valore di C_D è circa 1 e l'area frontale è compreso nell'intervallo che va dai 6 agli 8 m^2 . Ad esempio, per un carro armato del peso di 50 tonnellate, con $C_D = 1,17$, l'area frontale di $6,5m^2$, densità dell'aria pari a $1,225kg/m^3$, velocità del veicolo pari a 48 chilometri all'ora, e velocità del vento nulla, la resistenza aerodinamica è pari a $0,828kN$. La potenza necessaria per vincere la resistenza aerodinamica sarà di circa $11kW$.

2.4.1.2 Resistenza al moto di un veicolo in movimento

Nelle operazioni off-road, la resistenza al moto R_v può includere la resistenza a causa di ostacoli R_{ob} , resistenze interne degli organi in movimento R_{in} , e resistenza derivante alla interazione veicolo in movimento-terreno R_t .

- *Resistenza dovuta alla presenza di un ostacolo* - La resistenza R_{ob} si pone quando il veicolo è in movimento (ceppe, rocce e simili). Il suo valore dipende dall'altezza, dimensione, forma, ecc dell'ostacolo ed è determinato sperimentalmente.
- *Resistenza interna degli organi in movimento* - La resistenza interna dipende dal tipo di trasmissione del moto (cingolo o ruota), dal suo design e dai fattori operativi. Per un sistema cingolato, la resistenza interna è causata dal rotolamento delle pulegge sul cingolo, le perdite meccaniche nei perni di collegamento quando le catenarie ruotano l'uno rispetto all'altro (o perdite causate dalla flessione della gomma nel caso di cingoli di gomma), e di altri fattori. Il valore della resistenza interna dei cingoli viene determinata sperimentalmente. Per cingoli metallici

con perni di collegamento a secco, comunemente utilizzati nei trattori agricoli o industriali, il coefficiente di resistenza interna f_{in} , che è il rapporto tra la resistenza interna al moto e il peso del veicolo, può essere stimata dalla seguente equazione empirica (Bekker, 1969):

$$f_{in} = 0.06 + 0.009V \quad (2.31)$$

dove V è la velocità del veicolo in km/h . Per i veicoli militari cingolati che operano su superfici stradali lisce dure, il coefficiente di resistenza al movimento può essere considerato rappresentativo del coefficiente di resistenza interna f_{in} . Può essere stimato dalla seguente equazione empirica (Ogorkiewicz, 1991):

$$f_{in} = f_0 + f_s V \quad (2.32)$$

dove f_0 e f_s sono coefficienti empirici, e V è la velocità del veicolo in km/h . Per i cingoli con doppi perni di gomma fissati con anelli e tamponi in gomma, il valore di f_0 è tipicamente 0,03, per tutti i cingoli siderurgici è 0.025, e per i cingoli con giunti sigillati e lubrificati con cuscinetti ad aghi, si può partire da 0.015. Il valore di f_s varia con il tipo di cingolo, ed in prima approssimazione, può essere considerata pari a 0,00015. Quando un pneumatico rotola, l'energia viene dissipata principalmente attraverso l'isteresi del pneumatico causato dalla flessione della carcassa. Appare come una forza resistente che agisce contro il moto del pneumatico. Questo può essere considerato come la resistenza interna di un pneumatico R_{in} . La sua intensità dipende da una serie di fattori di progettazione e operativi, tra cui la costruzione del pneumatico (bias o radiale), dal materiale della carcassa, dalla pressione di gonfiaggio, dalla velocità, ecc.

- *Resistenza dovuta alla interazione veicolo in marcia-terreno* - Sul terreno non preparato, la resistenza R_t causata dalla interazione fuoristrada-terreno, come quella causata dallo sprofondamento del veicolo, di solito è il parametro più significativo. Sul terreno morbido, come la neve profonda, lo sprofondamento del veicolo in marcia può comportare che la pancia del veicolo possa essere in contatto con la superficie del terreno, inducendo una forza resistente aggiuntiva, comunemente nota come trascinarsi della pancia.

$$F = \frac{M_e \xi \eta t}{r} \quad (2.33)$$

$$V = \frac{n_e r}{\xi} (1 - i) \quad (2.34)$$

$$F_d = F - \sum R \quad (2.35)$$

$$i = 1 - \frac{V}{V_t} = 1 - \frac{V}{r\omega} \quad (2.36)$$

$$P_d = F_d = (F - \sum R)V_t(i - 1) \quad (2.37)$$

2.4.2 Metodi per la valutazione della performance di veicoli cingolati

Il cingolo è stato concepito nel XVIII secolo come una ferrovia mobile ed i mezzi cingolati sono stati utilizzati su larga scala fin dall'inizio del secolo scorso. Tuttavia, per un lungo periodo di tempo, lo sviluppo e la progettazione di veicoli cingolati sono stati, nel complesso, guidati dall'esperienza passata e la metodologia copia e prova. Poiché le condizioni economiche e sociali cambiano con il rapido progresso della tecnologia, l'approccio 'trial and error' di sviluppo dei veicoli off-road è diventato estremamente inefficiente e sono emersi costi proibitivi. Inoltre, nuovi requisiti per una maggiore mobilità su un'ampia gamma di terreni in tutte le stagioni, e la crescente domanda di risparmio energetico e tutela ambientale. Ciò ha portato al riconoscimento della necessità di creare dei modelli matematici per i veicoli fuoristrada che consentano lo sviluppo e la progettazione per valutare una vasta gamma di opzioni e per selezionare una configurazione ottimale per un dato veicolo a seconda della missione e dell'ambiente. Per essere utile per il progettista lo sviluppo e l'ottimizzazione di un veicolo off-road, un modello matematico del veicolo cingolato dovrebbe tener conto di tutti i principali parametri operativi, nonché delle caratteristiche del terreno. Una varietà di modelli per la previsione e la valutazione delle prestazioni del veicolo cingolato sono stati sviluppati. Una breve rassegna di alcuni dei metodi empirici e dei metodi parametrici per l'analisi e la previsione delle distribuzioni di pressione statica sotto i cingoli è stata riportata di seguito.

2.4.2.1 Metodi empirici

È generalmente riconosciuto che l'interazione tra un veicolo cingolato e il terreno è molto complesso ed è difficile da modellare accuratamente. Per

aggirare questa difficoltà, sono stati sviluppati modelli empirici. In generale, questi modelli sono basati sui risultati dei test di un numero di veicoli cingolati rappresentativi su una gamma di terreni di interesse. Le prestazioni misurate del veicolo vengono quindi empiricamente correlate con le condizioni del terreno, di solito identificati da osservazioni e misurazioni semplici. Questo può portare alla creazione di una scala di valutazione di mobilità del veicolo e sulla trafficabilità del terreno. Uno dei metodi empirici ben noti per la valutazione delle prestazioni dei veicoli off-road è quello sviluppato dall'US Army Corps of Engineers (WES). Nello sviluppare questo metodo, i veicoli sono stati testati su una serie di terreni, suoli prevalentemente a grana sottile. Terreni a grana fine sono i terreni argillosi per esempio. I terreni a grana grossa sono invece le spiagge e i terreni desertici. Le condizioni del terreno sono state identificate utilizzando un penetrometro a cono. I dati misurati delle condizioni di performance dei veicoli e del terreno sono stati poi empiricamente correlati, e un modello noto come il modello WES VCI è stato proposto per la previsione delle prestazioni del comportamento del veicolo. Questo modello costituisce la base per i successivi sviluppi dei modelli di mobilità. Per illustrare la metodologia di questo tipo di modelli empirici, le caratteristiche di base del modello WES VCI sono descritte di seguito come esempio. Nel modello WES VCI, un'equazione empirica è stata istituita per calcolare prima l'indice di mobilità (MI) di un veicolo in termini di determinate caratteristiche di progettazione del veicolo.

2.4.2.2 Metodo parametrico

Uno dei metodi più noti per l'analisi parametrica delle prestazioni del veicolo cingolato è quella originariamente sviluppata da Bekker (1956). In questo metodo, il cingolo a contatto con il terreno si considera simile ad un basamento rigido. Se il centro di gravità del veicolo è situato nel punto centrale dell'area di contatto del cingolo, la distribuzione normale di pressione può essere assunta come uniforme. D'altra parte, se il centro di gravità del veicolo è collocato davanti o dietro il punto centrale dell'area di contatto, una distribuzione a forma trapezoidale sarà assunta. Sulla base della pressione di contatto assunta, e facendo uso della relazione pressione-deformazione ottenuto dalla prova bevameter, lo sprofondamento del cingolo può essere previsto. Utilizzando l'equazione pressione-deformazione di Bekker, per un cingolo con pressione di contatto uniforme, lo sprofondamento z_0 è dato da

$$Z_0 = \left(\frac{p}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} = \left(\frac{W/bl}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (2.38)$$

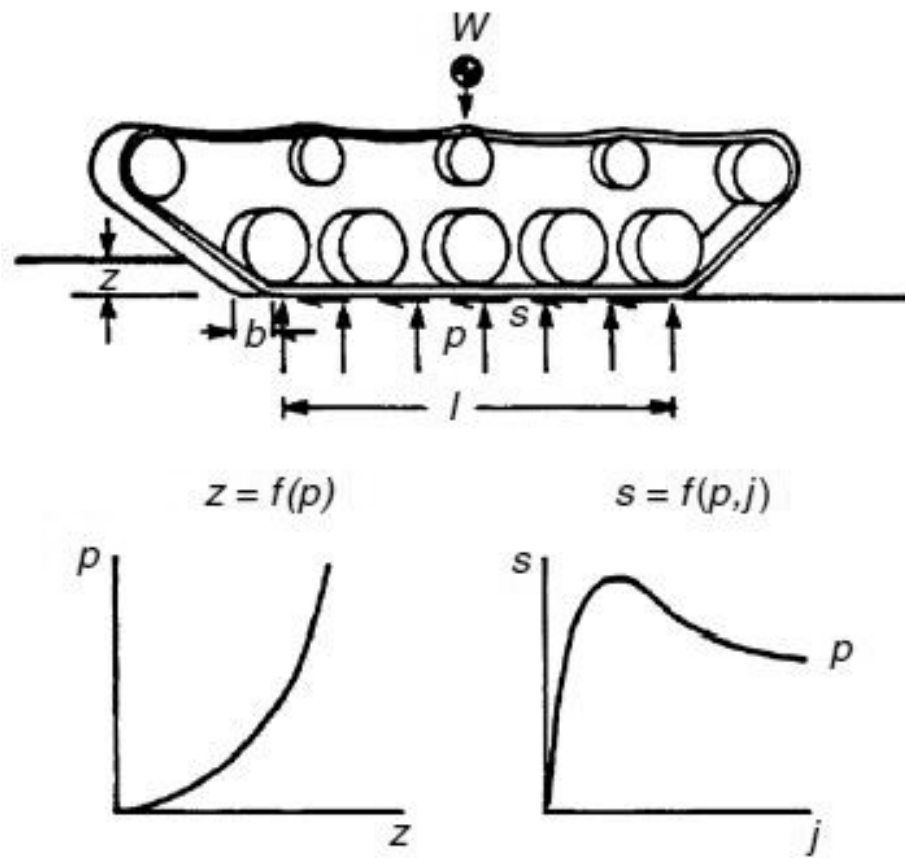


Figura 2.78: Modello semplificato per la valutazione della performance

dove b e l sono la larghezza e la lunghezza di contatto del cingolo, rispettivamente, e W è il carico normale sulla pista. Il lavoro effettuato nel compattazione del terreno a una profondità di z_0 da un cingolo di larghezza b e lunghezza l di contatto e con pressione di contatto uniforme è data da

$$\text{Lavoro compiuto} = bl \int_0^{z_0} p dz = bl \int_0^{z_0} (k_c/b + k_\phi) z^n dz = bl(k_c/b + k_\phi) \left(\frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right) \quad (2.39)$$

Sostituendo per z_0 da Eqn (7.6) si ottiene

$$\text{Lavoro compiuto} = \frac{bl}{(n+1)(k_c/b + k_\phi)^{1/n}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{(n+1)/n} \quad (2.40)$$

Se il cingolo è tirato di una distanza l nella direzione orizzontale, il lavoro svolto dalla forza di traino, che è uguale in grandezza alla resistenza causata dalla compattazione R_c , può essere equiparato al lavoro svolto nel fare un solco di larghezza b e lunghezza l ad una profondità di z_0 , come espresso da Eqn (7.8):

$$R_c l = \frac{bl}{(n+1)(k_c/b + k_\phi)^{1/n}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{(n+1)/n} \quad (2.41)$$

e

$$R_c = \frac{1}{(n+1)b^{1/n}(k_c/b + k_\phi)^{1/n}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{(n+1)/n} \quad (2.42)$$

Per prevedere lo sforzo di trazione di un veicolo cingolato, la sollecitazione di taglio sviluppato all'interfaccia cingolo-terreno deve essere determinata. Come discusso precedentemente, lo sforzo di taglio è legato allo spostamento. Pertanto, è essenziale analizzare lo sviluppo dello sforzo di taglio sotto il cingolo. Quando una coppia motrice viene applicata al pignone, azioni di taglio si presentano all'interfaccia cingolo-terreno. Di conseguenza, c'è un movimento relativo tra il cingolo e il terreno (o di deformazione di taglio) in direzione orizzontale, che si traduce in slittamento del cingolo. Lo slittamento i di un cingolo è definito da

$$i = 1 - \frac{V}{r\omega} = 1 - \frac{V}{V_t} = \frac{V_t - V}{V_t} = \frac{V_j}{V_t} \quad (2.43)$$

e

$$V_j = r\omega i$$

dove V è la velocità effettiva in avanti del cingolo, V_t è la velocità teorica del cingolo che è il prodotto del raggio r e velocità angolare ω del pignone,

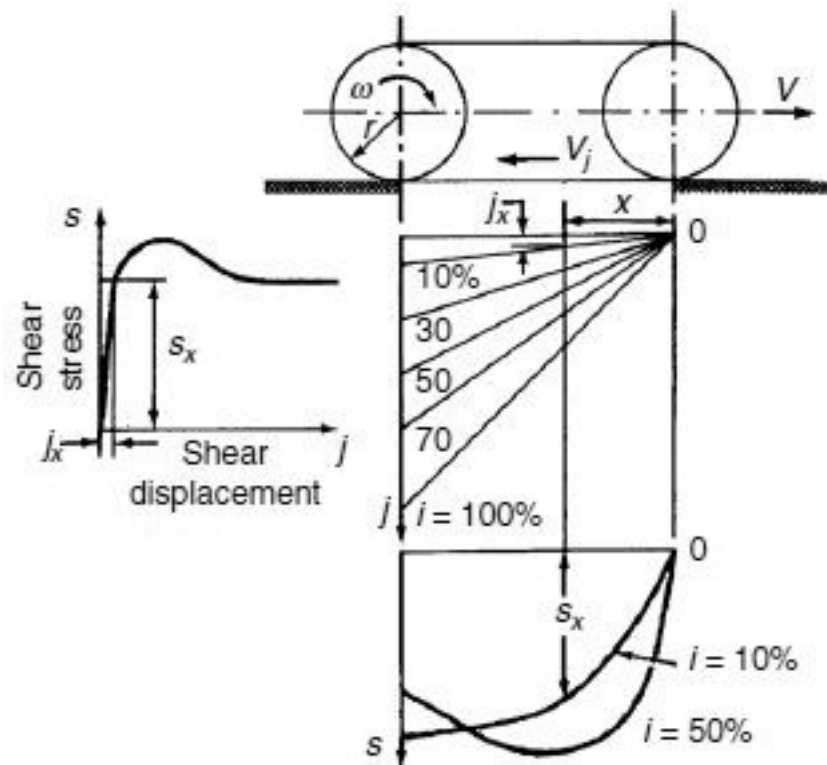


Figura 2.79: Sviluppo della deformazione di taglio e della sollecitazione di taglio per un cingolo rigido

e V_j è la velocità di scorrimento della traccia. Va notato che la velocità di scorrimento V_j della traccia è nella direzione opposta della velocità di avanzamento della traccia V . Per un cingolo metallico, come quello utilizzato nei trattori agricoli o industriali, si può presumere che il cingolo sia rigido e che non può essere allungato. La velocità di slittamento V_j è, dunque, la stessa per ogni punto del cingolo in contatto con il terreno. Lo spostamento j in un punto situato ad una distanza x dal fronte del cingolo è dato da

$$j = V_j t \quad (2.44)$$

dove t è il tempo di contatto del punto in questione con il terreno ed è uguale a x/V_t e può essere riscritta come

$$j = \frac{V_j x}{V_t} i x \quad (2.45)$$

Ciò indica che la deformazione di taglio sotto una pista avente una superficie di contatto piana aumenta linearmente da zero nella parte anteriore alla parte posteriore dell'area di contatto. Se la pressione normale sul cingolo è distribuita uniformemente, e il rapporto sforzo-deformazione è descritto dalla semplice equazione esponenziale, lo sforzo di trazione F di un cingolo con un superficie di contatto piana può essere espressa come

$$\begin{aligned} F &= b \int_0^l \left(c + \frac{W}{bl} \tan \phi \right) (1 - e^{-ix/K}) dx \\ &= (Ac + W \tan \phi) \left[1 - \frac{K}{il} (1 - e^{-il/K}) \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

dove A , B e L sono la zona di contatto, larghezza di contatto e lunghezza di contatto della pista, rispettivamente, C , F e K sono la coesione, angolo di taglio parametro di resistenza al taglio e deformazione, rispettivamente, i è la pista di scorrimento, e W è il carico normale sul cingolo. Se la pressione normale non è distribuita uniformemente lungo la lunghezza di contatto del cingolo, la procedura descritta sopra può ancora essere utilizzato per prevedere la spinta sviluppata da un cingolo in funzione dello slittamento. Per esempio, se la pressione normale ha una distribuzione multi-picco sinusoidale la pressione normale è espressa da

$$p = \frac{W}{bl} \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \quad (2.47)$$

dove n è il numero di periodi. Va notato che in questo caso la pressione p_{max} di picco è due volte la pressione media $P_{mean} = W/bl$. In un terreno

ruvido, la sollecitazione di taglio sviluppata lungo la lunghezza di contatto può essere espressa

$$s = \frac{W}{bl} \tan\phi \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) (1 - e^{-ix/K}) \quad (2.48)$$

e quindi lo sforzo di trazione in funzione dello slittamento è dato da

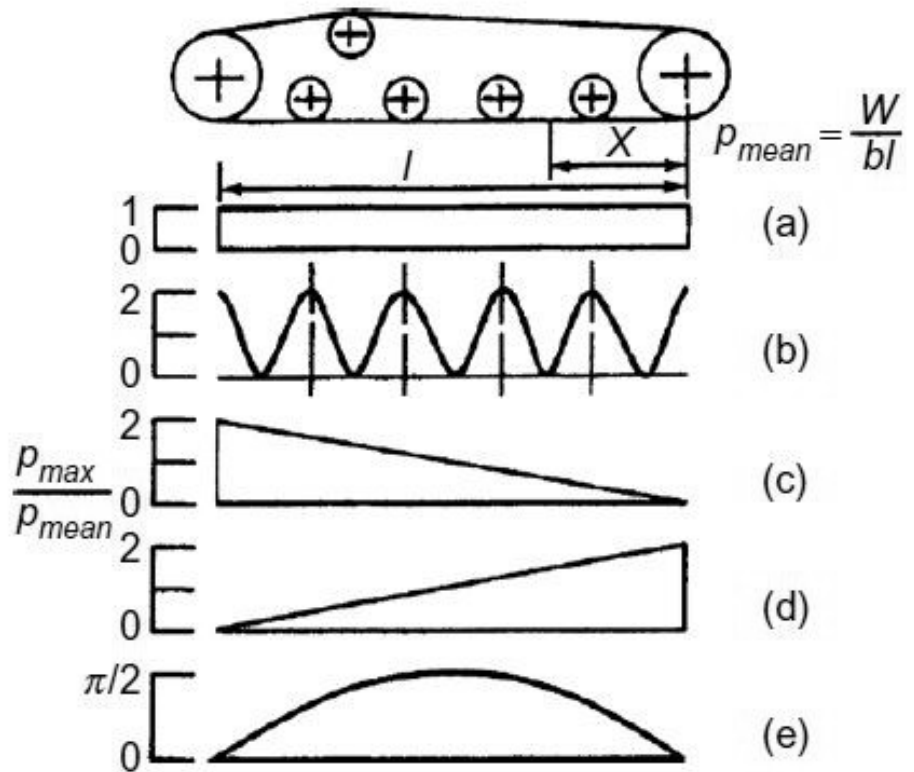


Figura 2.80: Varie distribuzioni di pressione normali idealizzati sotto un cingolo

$$F = b \int_0^l \frac{W}{bl} \tan\phi \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) (1 - e^{-ix/K}) dx \quad (2.49)$$

$$= W \tan\phi \left[1 + \frac{K}{il} (e^{-il/K} - 1) + \frac{K(e^{-il/K} - 1)}{il(1 + 4n^2 K^2 \pi^2 / i^2 l^2)} \right] \quad (2.50)$$

Nel caso in cui la pressione normale aumenta linearmente dalla parte anteriore alla parte posteriore della zona di contatto la distribuzione normale di pressione è descritta da

$$p = \frac{2W}{bl} \frac{x}{l} \quad (2.51)$$

e in un terreno con attrito, la forza di trazione in funzione dello slittamento è espresso da

$$F = W \tan \phi \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{-il/K} - \frac{il}{K} e^{-il/K} \right) \right] \quad (2.52)$$

Se la pressione normale diminuisce linearmente dalla parte anteriore alla parte posteriore dell'area di contatto, la distribuzione normale di pressione è espressa da

$$p = \frac{2W}{bl} \frac{(l-x)}{l} \quad (2.53)$$

e su un terreno con attrito, la forza di trazione è data da

$$F = 2W \tan \phi \left[1 - \frac{K}{il} \left(1 - e^{-il/K} \right) \right] - W \tan \phi \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{-il/K} - \frac{il}{K} e^{-il/k} \right) \right] \quad (2.54)$$

Nel caso in cui la pressione normale ha una distribuzione sinusoidale con la massima pressione al centro e pressione zero nei punti di contatto anteriore e posteriore, la distribuzione normale di pressione è descritta da

$$p = \frac{W}{bl} \frac{\pi}{2} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right) \quad (2.55)$$

Va notato che in questo caso la pressione massima nel punto centrale, p_{max} , è uguale a $(\pi/2)(W/bl)$. Su un terreno di attrito, la forza di trazione in funzione dello slittamento è espresso da

$$F = W \tan \phi \left[1 - \frac{e^{-il/K+1}}{2(1 + i^2 l^2 / \pi^2 K^2)} \right] \quad (2.56)$$

Dalla resistenza al movimento, dalla forza di trazione in funzione dello slittamento possono essere determinate le prestazioni di trazione complessive del veicolo.

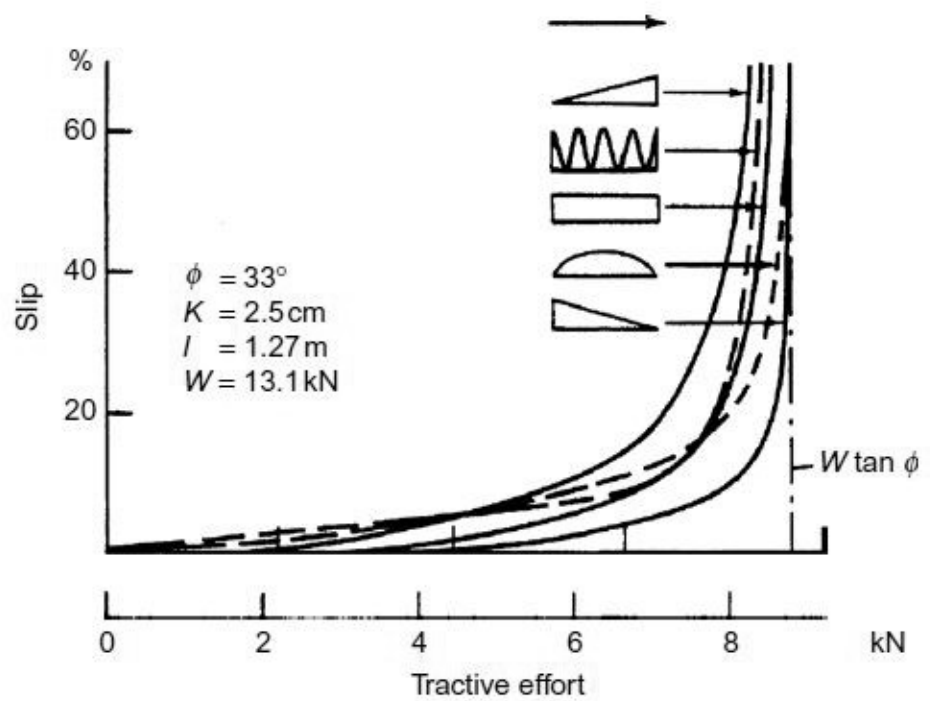


Figura 2.81: Effetti della distribuzione normale pressione sullo sforzo di trazione (spinta) di una traccia sabbia

2.4.3 Modelli Cinematici per Veicoli Cingolati

I modelli dinamici di veicoli cingolati hanno comprovato in passato la loro utilità nella progettazione delle leggi di controllo e la loro affidabilità per le simulazioni ma possono essere troppo onerose dal punto di vista computazionale per la navigazione del robot in tempo reale. In alternativa, in questa sezione discuteremo delle relazioni geometriche che possono essere utilizzate al posto di tali modelli. Per il sistema di riferimento locale del veicolo, si è assunto l'origine coincidente col baricentro del veicolo al centro dell'area definita dalle superfici di contatto di entrambi i cingoli, e il versore dell'asse Y è allineato con la direzione del moto in avanti. Allo stesso modo di un azionamento differenziale, un veicolo cingolato è governato da due ingressi di controllo: la velocità del suo cingolo destro e la velocità del suo cingolo sinistro (V_{dx}, V_{sx}). Una analisi cinematica diretta potrebbero essere indicata come segue:

$$(v_x, v_y, \omega_z) = f_d(V_{dx}, V_{sx}) \quad (2.57)$$

dove (v_x, v_y) è la velocità del veicolo lineare rispetto alla sua terna di riferimento locale, e ω_z , rappresenta la sua velocità angolare. Al contrario, le leggi di controllo che ci permettano di percorrere una traiettoria desiderata possono essere espresse mediante una analisi cinematica inversa:

$$(V_{dx}, V_{sx}) = f_i(v_x, v_y, \omega_z) \quad (2.58)$$

Nel moto piano, il centro istantaneo di rotazione (ICR) di un veicolo, considerando il veicolo come un corpo rigido, è definito come il punto nel piano in cui il moto del veicolo può essere rappresentato da una rotazione senza alcuna traslazione. Nel moto piano di un veicolo cingolato, non solo il moto dell'intero veicolo può essere preso in considerazione, ma anche il moto di ciascuno dei suoi cingoli rispetto al suolo. La velocità angolare dei due cingoli sul piano è la stessa di quella del veicolo, poichè non possono ruotare attorno all'asse Z del veicolo. Un cingolo può essere modellato come un corpo rigido con un ulteriore grado di libertà, che è la velocità di rotolamento del cingolo. Per cui, il movimento dei punti di un cingolo sono la composizione del moto del veicolo in aggiunta al moto di rotolamento del cingolo. A causa di questo, l'ICR di un cingolo sul piano è differente dal centro di istantanea rotazione dell'intero veicolo (vedi fig. 1). Infatti, l'ICR dei cingoli sul piano giacciono in posizioni sconosciute a priori su di una linea parallela all'asse X locale, che contiene anche l'ICR dell'intero veicolo, a causa del teorema del centro di istantanea rotazione di Kennedy. Le coordinate sul riferimento locale per l'ICR dell'intero veicolo e quello per il cingolo sinistro

e destro (ICR_{sx} e ICR_{dx} rispettivamente) possono essere geometricamente ottenuti come:

$$x_{ICR} = \frac{-v_y}{\omega_z} \quad (2.59)$$

$$y_{ICR} = y_{ICR_{sx}} = y_{ICR_{dx}} = \frac{v_x}{\omega_z} \quad (2.60)$$

$$x_{ICR_{sx}} = \frac{v_{sx} - v_y}{\omega_z} \quad (2.61)$$

$$x_{ICR_{dx}} = \frac{v_{dx} - v_y}{\omega_z} \quad (2.62)$$

dove $v = (v_x, v_y)$ è la velocità di traslazione del veicolo in coordinate locali. Si deve notare che la coordinata x dell'ICR per l'intero veicolo può variare da $\pm\infty$ a seconda della sua curvatura, mentre le coordinate dell'ICR dei cingoli $x_{ICR_{sx}}$ e $x_{ICR_{dx}}$ sono limitate per un dato intervallo di velocità []. Se vengono calcolate le funzioni inverse, le velocità di traslazione e rotazione istantanei rispetto al riferimento locale possono essere ottenute come:

$$v_x = \frac{V_{dx} - V_{sx}}{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}} y_{ICR} \quad (2.63)$$

$$v_y = \frac{V_{dx} - V_{sx}}{2} - \frac{V_{dx} - V_{sx}}{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}} \frac{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}}{2} \quad (2.64)$$

$$\omega_x = \frac{V_{dx} - V_{sx}}{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}} \quad (2.65)$$

Queste equazioni rappresentano la cinematica diretta del veicolo forniti dalla 2.57 se l'ICR dei cingoli destro e sinistro possono essere valutati adeguatamente. D'altra parte, le relazioni per la cinematica inversa possono essere espressi con:

$$V_{dx} = \sqrt{\|v\|^2 - y_{ICR}^2 \omega_z^2} + x_{ICR_{dx}} \omega_z \quad (2.66)$$

$$V_{sx} = \sqrt{\|v\|^2 - y_{ICR}^2 \omega_z^2} + x_{ICR_{sx}} \omega_z \quad (2.67)$$

che includono una restrizione non anolonomica, poichè v_x e v_y non possono essere imposte separatamente. Si deve notare che queste stesse espressioni rappresentano anche la cinematica diretta e inversa per veicoli su ruote con guida differenziale. La differenza tra i due sistemi di trazione è che mentre

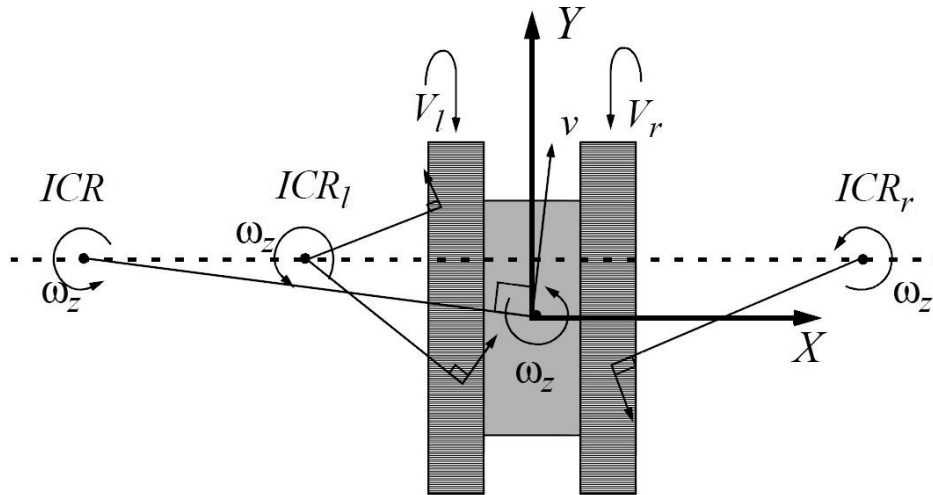


Figura 2.82: Centri istantanei di rotazione sul piano. L'intero veicolo (corpo rigido) segue un percorso circolare attorno ad ICR , che si trova sull'asse definito da ICR_L e ICR_r

l'ICR per ruote ideali in assenza di scorrimento laterale sono costanti e si trovano i punti di contatto a terra, l'ICR nel caso di cingoli sono dipendenti dalla dinamica e sempre si trovano all'esterno dei cingoli a causa dello slittamento. Pertanto, meno slittamento significa che i ICR sono più vicini al veicolo. Inoltre, la posizione del centro di massa del veicolo influisce significativamente l'ICR nel caso cingolato. Quanto più il baricentro è prossimo ad un lato, quanto meno il cingolo di quel lato tenderà a scivolare a causa della pressione esercitata da quel lato, tanto più l'ICR di quel cingolo sarà vicino. Inoltre, meno slittamento si verificherà se il baricentro è vicino alle estremità anteriore o posteriore del veicolo, poichè la distribuzione della pressione si concentra su una porzione della superficie di contatto dei cingoli. Ciò si traduce in ICR più stretti. Un indice di efficienza di sterzata del veicolo può essere definita come la distanza normalizzata tra gli ICR dei cingoli:

$$c = \frac{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}}{L}; (c \geq 1) \quad (2.68)$$

dove L è la distanza tra le mezzerie dei cingoli. L'indice c è uguale a 1 quando non si verifica slittamento (cioè veicoli con guida differenziale ideale). In maniera simile, un indice di eccentricità normalizzato può essere definito

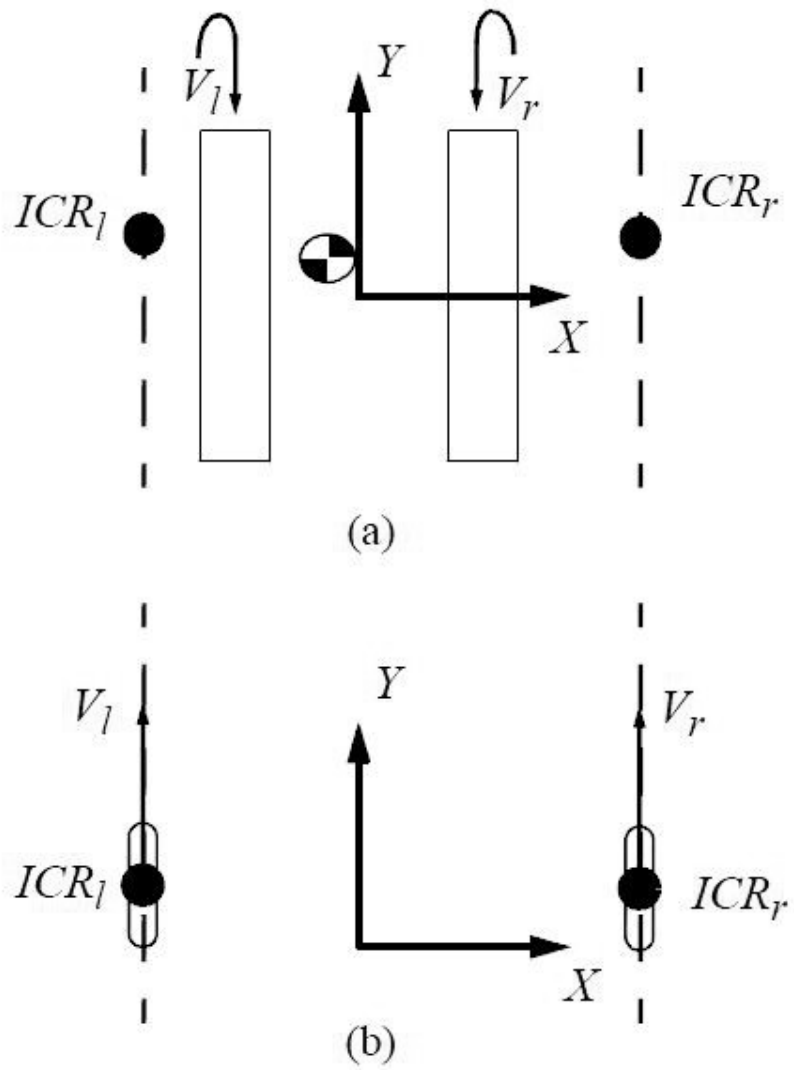


Figura 2.83: Confronto tra i centri di istantena rotazione di un veicolo cingolato (a) e nel caso di azionamento differenziale (b).

come segue:

$$e = \frac{x_{ICR_{dx}} + x_{ICR_{sx}}}{x_{ICR_{dx}} - x_{ICR_{sx}}} \quad (2.69)$$

L'indice e è uguale a 0 quando l'ICR del cingoli è disposto in maniera simmetrica rispetto all'asse locale Y . La maggiore conseguenza di quanto riportato sopra, è gli effetti dinamici del veicolo vengono introdotti nel modello cinematico mediante l'uso di soli due punti in coordinate locali: ICR_{sx} e ICR_{dx}

Capitolo 3

Le macchine agricole

Una macchina agricola è una macchina costruita per svolgere una o più lavorazioni agricole. Si possono distinguere due categorie di macchine agricole : semoventi e quelle trainate da trattori. Nel corso dei millenni tali macchine si sono evolute di pari passo con l'evoluzione della tecnologia e delle fonti energetiche diventando sempre più efficienti e in grado di svolgere più operazioni contemporaneamente. In particolare, vengono classificate come:

- Semoventi (motore proprio):
 - Trattatrici agricole
 - Macchine agricole operatrici a un asse
 - Macchine agricole operatrici a due o più assi
- Trainate (prive di motore):
 - Macchine agricole operatrici
 - Rimorchi agricoli

3.1 Macchine Semoventi (Motore Proprio)

Con la parola *semoventi* si indica la categoria di macchine agricole dotate di motore proprio e quindi mosse da energia meccanica non umana. Si possono dividere in tre categorie :

Trattrici Agricole

Macchine a motore munite di almeno due assi. Possono essere dotate di ruote pneumatiche, semi pneumatiche, metalliche, o di cingoli. Sono concepite per tirare, spingere o portare attrezzature, prodotti agricoli o sostanze per uso agrario. Possono essere dotate, o meno, di piano di carico, e sono in grado anche di trasportare gli addetti alle lavorazioni.

Macchine Agricole Operatrici a un Asse

Macchine guidabili dal conducente a terra. Possono avere un carrello separabile destinato esclusivamente al trasporto del conducente. Rientrano in questo gruppo:

- Motofalci
- Motocoltivatori
- Motozappe
- Motocarriole
- Mini dumper

La loro massa complessiva non può superare 0,7 t, compreso il conducente. Non possono trainare rimorchi, ad eccezione del carrello separabile per il conducente, che è considerato parte integrante del veicolo cui è agganciato.

Macchine Agricole Operatrici a Due o più Assi

Macchine munite o predisposte per l'applicazione di speciali apparecchiature per eseguire operazioni agricole (raccolti bietole, mietitrebbie, ecc.)

3.2 Macchine Trainate (Prive di Motore)

Per circolare devono necessariamente essere trainate dalle macchine agricole semoventi ovvero dalle trattrici agricole o dalle macchine agricole operatrici a due o più assi (non da quelle a un asse in quanto queste possono trainare solo il carrello separabile per il conducente), sono destinate all'esecuzione di operazioni agricole o al trasporto di attrezzature (seminatrici, erpici, imballatrici, estirpatori, aratri, spandiletame, spandiconcime, ecc.)

Macchine Agricole Operatrici (Prive di Motore)

Possono essere:

- Di tipo trainato, se la loro massa poggia integralmente sulla trattrice agricola.
- Di tipo semi trainato, se la loro massa grava in parte sulle ruote di cui sono dotate e in parte sulla trattrice agricola, alla quale sono agganciate con un sistema di attacco che consente oscillazioni solo lungo il piano verticale.

Rimorchi Agricoli

Veicoli destinati al carico e trainabili dalle trattrici agricole. Possono trasportare macchine agricole o macchine operatrici impiegate nelle attività agricole e forestali. Sono considerati parte integrante della trattrice (rimorchio appendice) se:

- Massa a pieno carico $< 1,5$ t
- Larghezza < 2 m
- Lunghezza (compresi gli organi di aggancio) < 4 m

Fatta una classificazione generale delle diverse tipologie di macchine agricole, passiamo nello specifico a descrivere la macchina agricola utilizzata.

Il veicolo cingolato è un MINI TRANSPORTER TT350 della TEKNA srl, azienda impegnata nella realizzazione di macchine per l'agricoltura e giardinaggio. La gamma di MiniTransporters cingolati rappresenta una buona soluzione ideale per movimentare materiale, dal piccolo utilizzatore all'utente professionale in tutte quelle condizioni di difficile accesso e transito. Trovano largo impiego nei più svariati campi di utilizzo in Agricoltura per il trasporto di frutta, ortaggi, etc. in campo o in serra, nel Forestale per il trasporto di legname nei boschi etc., in Zootecnia per la pulizia di stalle o trasporto mangimi, in Edilizia per trasporto materiali da costruzione soprattutto in circostanze di spazi limitati, in Giardinaggio per il trasporto di attrezzi, vasi, terriccio etc. I MiniTransporters riescono ad arrampicarsi in difficili condizioni e pendenze, in presenza di fango o scalini, questo grazie alla consistenza della macchina nonché ai robusti cingoli in gomma che assicurano grip e stabilità. Sono macchine semoventi dotate di trasmissione meccanica con un robusto riduttore ad ingranaggi in bagno d'olio con blocco



Figura 3.1: Motocarriola MINI TRANSPORTER TT350

Modello: TRANSPORTER TT 350		
Dati	Descrizione	Valori
Motore	4 tempi 4,5 HP Alimentazione a BENZINA	
Dimensioni macchina	Larghezza	670 mm
	Altezza	1090 mm
	Lunghezza	1610 mm
Peso		
Portata Max	Velocità di marcia minima	350 kg
Trasmissione	Meccanica	Riduttore meccanico a 3 + 1 velocità
Cingoli Superficie a contatto con il suolo	Larghezza cingolo	180 mm
	Carreggiata	670 mm
	Lunghezza impronta	580 mm

Tabella 3.1: Dati tecnici della motocarriola

differenziale interno per avere i due cingoli sempre in trazione. Le frizioni di sterzo sono in bagno d'olio contenute all'interno del riduttore meccanico. Sono tutte equipaggiate con motore a benzina quattro tempi.

Capitolo 4

Modellazione Multi-body

La dinamica multi-body permette di sviluppare metodi per l'analisi dinamica di sistemi multicorpo costituiti da componenti rigidi e deformabili interconnessi. Molti sistemi meccanici e strutturali come i veicoli, veicoli spaziali, robot ect., sono costituiti da componenti interconnessi che subiscono grandi traslazione e movimenti di rotazione. Figura 4.1 mostra alcuni esempi di tali sistemi che possono essere modellati come sistemi multi-body. In generale, un sistema multi-body è definito come un insieme di sottosistemi chiamato organi, componenti o sottostrutture. Il movimento dei sottosistemi è cinematicamente vincolato a causa di diversi tipi di giunti, e ciascun sottosistema o componente può subire grandi traslazioni e spostamenti di rotazione. Fondamentale è la comprensione del moto dei sottosistemi (corpi o componenti). Il movimento dei corpi materiali è stato oggetto delle prime ricerche condotte in tre diversi campi, ovvero la meccanica del corpo rigido, la meccanica strutturale e meccanica dei continui. Con il termine corpo rigido si implica che la deformazione del corpo in esame si presume piccolo, tale che, la deformazione del corpo non ha effetto sul movimento del corpo. Quindi, per un corpo rigido, la distanza tra due punti qualsiasi delle sue particelle rimane sempre costante ed in tutte le configurazioni. Il moto di un corpo rigido nello spazio può essere completamente descritto utilizzando sei coordinate generalizzate. Tuttavia, il modello matematico risultante in generale è altamente non lineare a causa della rotazione del corpo grande. D'altra parte, con il termine meccanica strutturale si indica lo studio in cui la deformazione è la preoccupazione principale. Ampie rotazioni del corpo non sono consentite. In molte applicazioni, tuttavia, un gran numero di coordinate elastiche devono essere inclusi nel modello

matematico per descrivere accuratamente la deformazione del corpo. Dallo

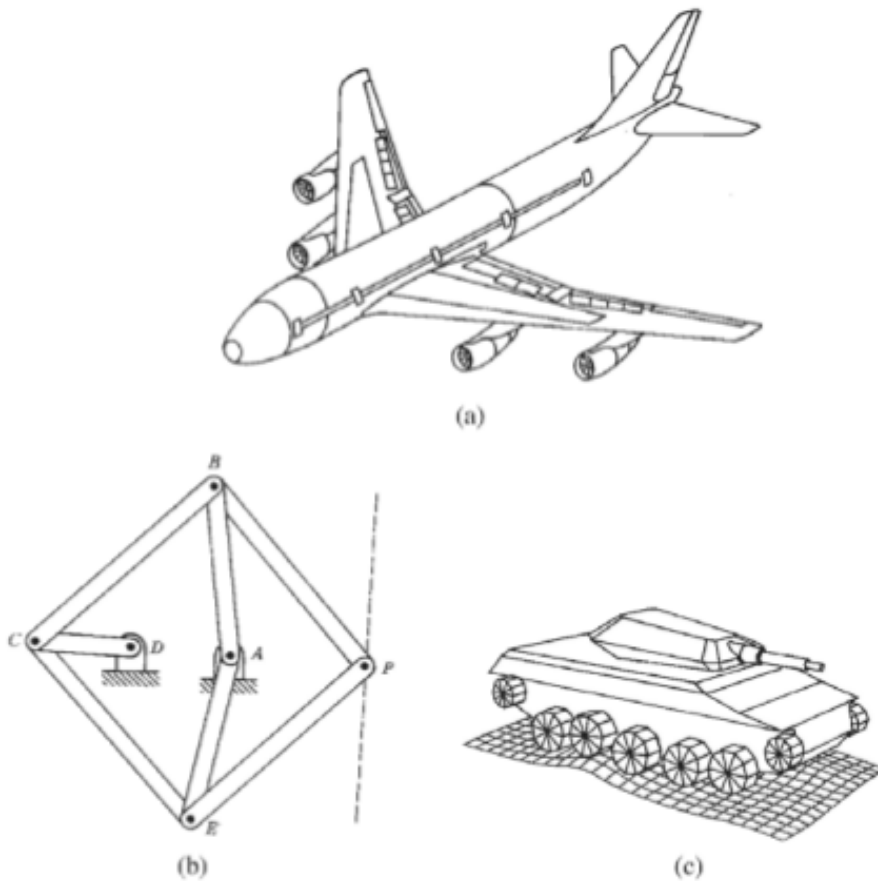


Figura 4.1: Sistemi Meccanici

studio dei corpi rigidi e dalla meccanica strutturale, l'evoluzione naturale ha portato alla meccanica del continuo, in cui il movimento generale del corpo è descritto da un modello matematico che conserva gli svantaggi dei casi precedenti, principalmente non-linearità e grande dimensionalità. Ciò crea molti problemi computazionali che saranno affrontati nei capitoli successivi. Negli ultimi anni, è stata data maggiore enfasi alla realizzazione di sistemi ad alta velocità, leggeri, e ad elevata precisione. La necessità di una migliore progettazione, oltre al fatto che molti sistemi meccanici e strutturali operano in ambienti ostili, ha reso necessario l'inserimento di molti fattori

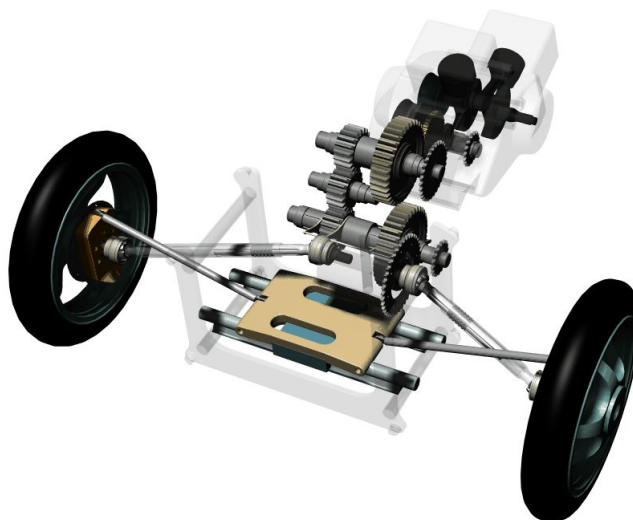


Figura 4.2: Sistema Multi-body

che sono stati ignorati in passato. Sistemi come i motori, la robotica, le macchine utensili, e le strutture in generale possono operare a velocità elevate e in ambienti a temperature molto elevate. Si consideri, ad esempio, il meccanismo di Peaucellier mostrato in figura 4.1b, è progettato per generare un percorso in linea retta. La geometria di questo meccanismo è tale che $BC = BP = CE = EP$ e $AB = AE$. I punti A, C e P devono sempre trovarsi su di una linea retta passante per A. Il meccanismo soddisfa sempre la condizione di $AC \times AP = c$, dove c è una costante chiamata costante di inversione. Nel caso in cui $AD = CD$, il punto C deve tracciare un arco di cerchio e il punto P dovrebbe seguire una linea retta esatta. Tuttavia, questo non sarà il caso quando la deformazione dei collegamenti viene considerata. Se la flessibilità dei collegamenti viene considerata, il meccanismo può essere modellato come un sistema multi-body costituito da componenti rigidi e deformabili interconnessi, ciascuno dei quali può subire rotazioni finite. La connettività tra diversi componenti di questo meccanismo può essere descritto utilizzando giunti rotoidali (tornitura coppie). Questo meccanismo e altri esempi di figura 4.1, che hanno un diverso numero di organi e diversi tipi di giunti meccanici, sono esempi di sistemi meccanici e strutturali che possono essere visti come sistemi multi-body.

4.1 Meccanica dei corpi rigidi

Rispetto alle particelle, i corpi rigidi hanno masse distribuite. La configurazione di un corpo rigido nello spazio può essere identificato utilizzando sei coordinate. Tre coordinate descrivono la posizione del corpo, e tre coordinate definiscono l'orientamento del corpo. Figura 4.3 mostra un corpo rigido

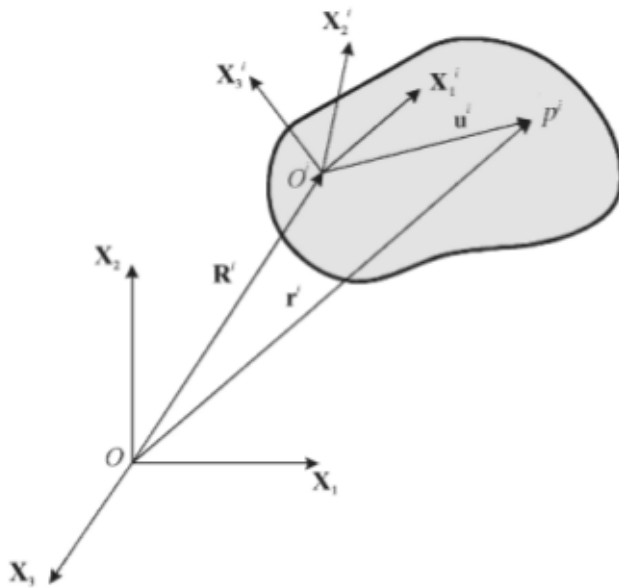


Figura 4.3: Meccanica dei Corpi Rigidi

denotato come corpo i -esimo in uno spazio tridimensionale. Consideriamo con $\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2\mathbf{X}_3$ una terna di riferimento fissa rispetto al tempo e indichiamo con $\mathbf{X}_1^i\mathbf{X}_2^i\mathbf{X}_3^i$ un sistema di coordinate solidale col corpo i -esimo. La posizione globale di un punto P_i arbitrario del corpo i -esimo può essere definito come:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{R}_i + \mathbf{u}_i \quad (4.1)$$

dove con $\mathbf{r}_i = [r_1^i \ r_2^i \ r_3^i]^T$ è il vettore posizione globale del punto P_i , $\mathbf{R}_i = [R_1^i \ R_2^i \ R_3^i]^T$ è il vettore posizione globale dell'origine O_i del sistema locale e $\mathbf{u}_i = [u_1^i \ u_2^i \ u_3^i]^T$ è il vettore posizione di P_i rispetto ad O_i . Dal momento che è stato presupposto che il corpo è rigido, la distanza tra i punti P_i e O_i rimane costante durante il moto del corpo, cioè le componenti del vettore \mathbf{u}_i nel riferimento locale sono note e costanti. I vettori \mathbf{r}_i e \mathbf{R}_i ,

tuttavia, sono definiti nel sistema di coordinate globali, quindi, è importante essere in grado di esprimere il vettore \mathbf{u}_i in termini delle sue componenti lungo gli assi globali determinati. A tal fine, occorre definire l'orientamento del sistema di riferimento locale rispetto al sistema di riferimento globale riferimento. Il passaggio tra i due sistemi di riferimento può essere realizzato in termini di coordinate rotazionali. Tuttavia, questo insieme di coordinate di rotazione non è unico, e molte rappresentazioni possono essere trovate in letteratura. Le coordinate orientazionali più comunemente utilizzate, quali angoli di Eulero, parametri di Eulero, parametri di Rodriguez e coseni direttori. In alcune di queste rappresentazioni vengono utilizzate più di tre coordinate orientazionali. In tali casi, le coordinate orientazionali non sono totalmente indipendenti, perché sono connesse da un insieme di equazioni algebriche. Poiché la 4.1 descrive la posizione globale di un punto arbitrario sul corpo, il corpo intero può essere completamente definito, purché le componenti del vettore sul lato destro di questa equazione sono noti. Questo implica che l'equazione generale del moto di un corpo rigido è equivalente alla traslazione di un punto, per esempio, O_i , sommato ad una rotazione. Un corpo rigido trasla se gli spostamenti di due punti qualsiasi del corpo durante una traslazione sono gli stessi. Un corpo rigido sperimenta una pura rotazione attorno ad un asse definito asse di rotazione, se le particelle che formano il corpo rigido si spostano su piani paralleli lungo cerchi centrati sullo stesso asse.

4.2 Cinematica

In una analisi bidimensionale, la configurazione del corpo rigido può essere realizzato utilizzando tre coordinate; due coordinate definiscono la posizione di un punto del corpo, e una coordinata definisce l'orientamento del corpo rispetto ad un sistema inerziale di riferimento selezionato. Si consideri il corpo rigido planare indicato come corpo i mostrato in figura 4.4. Sia $\mathbf{X}_1\mathbf{X}_2$ il sistema di riferimento fisso e $\mathbf{X}_1^i\mathbf{X}_2^i$ il sistema di riferimento solidale al corpo. Il vettore $\mathbf{R}^i = [R_1^i \ R_2^i]^T$ descrive la traslazione dell'origine del sistema di riferimento solidale con il corpo, mentre l'angolo θ^i descrive l'orientamento del corpo. L'insieme di coordinate cartesiane \mathbf{q}_r^i definite come:

$$\mathbf{q}_r^i = [\mathbf{R}_1^i \ \mathbf{R}_2^i \ \theta^i]^T \quad (4.2)$$

possono essere utilizzate per definire la configurazione del corpo, cioè, posizione, velocità e accelerazione di un punto arbitrario sul corpo che può

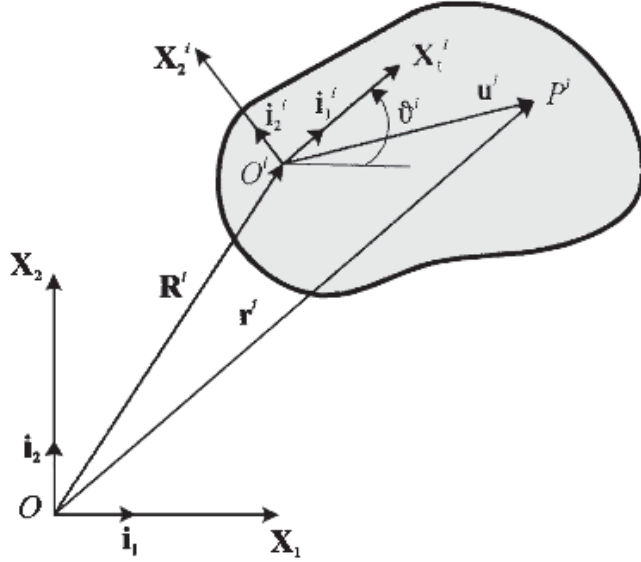


Figura 4.4: Coordinate Cartesianhe Assolute

essere scritta in termini di queste coordinate. Sia P^i un punto arbitrario sul corpo rigido i e \mathbf{i}_1^i e \mathbf{i}_2^i i versori del sistema di riferimento locale \mathbf{X}_1^i e \mathbf{X}_2^i rispettivamente. Il vettore posizione del punto P_i può essere definita come :

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{u}^i \quad (4.3)$$

dove $\mathbf{r}^i = [r_1^i r_2^i]^T$ è la posizione globale del punto P^i e $\mathbf{u}^i = [\bar{u}_1^i \bar{u}_2^i]^T$ è la posizione di P^i nel sistema di riferimento locale, cioè:

$$\mathbf{u}^i = \bar{u}_1^i \mathbf{i}_1^i + \bar{u}_2^i \mathbf{i}_2^i \quad (4.4)$$

dove \bar{u}_1^i e \bar{u}_2^i sono costanti perché il corpo è considerato rigido. Per ottenere il vettore velocità del punto P^i basta derivare la 4.3 rispetto al tempo.

$$\mathbf{v}^i = \frac{d\mathbf{r}^i}{dt} = \dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\mathbf{u}}^i \quad (4.5)$$

dove $\dot{\mathbf{u}}^i$ può essere ottenuto derivando la 4.4. Per cui :

$$\dot{\mathbf{u}}^i = \bar{u}_1^i \frac{d\mathbf{i}_1^i}{dt} + \bar{u}_2^i \frac{d\mathbf{i}_2^i}{dt} = \bar{u}_1^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2^i - \bar{u}_2^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1^i \quad (4.6)$$

Definiamo ω^i come vettore velocità angolare del corpo i , come

$$\omega^i = \dot{\theta}^i \mathbf{i}_3^i \quad (4.7)$$

dove \mathbf{i}_3^i è il versore che passa per il punto O^i ed è perpendicolare a \mathbf{i}_1^i ed \mathbf{i}_2^i . Si può verificare che:

$$\omega^i \times \mathbf{u}^i = \begin{vmatrix} \mathbf{i}_1^i & \mathbf{i}_2^i & \mathbf{i}_3^i \\ 0 & 0 & \dot{\theta}^i \\ \bar{u}_1^i & \bar{u}_2^i & 0 \end{vmatrix} = -\bar{u}_2^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1^i + \bar{u}_1^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2^i \quad (4.8)$$

Comparando la 4.6 e la 4.8 si arriva a :

$$\mathbf{v}^i = \dot{\mathbf{R}}^i + \omega^i \times \mathbf{u}^i \quad (4.9)$$

che dimostra che la velocità di un punto arbitrario di un corpo rigido può essere scritta in termine di derivate temporali delle coordinate $\mathbf{q}_r^i = [\mathbf{R}^{iT} \theta^i]^T$. Differenziando la 4.9 rispetto al tempo, una espressione per il vettore accelerazione può essere ottenuta in termini delle coordinate \mathbf{q}_r^i come segue:

$$\mathbf{a}^i = \frac{d\mathbf{v}^i}{dt} = \ddot{\mathbf{R}}^i + \dot{\omega}^i \times \mathbf{u}^i + \omega^i \times \dot{\mathbf{u}}^i \quad (4.10)$$

Definendo il vettore accelerazione angolare α^i del corpo i come :

$$\alpha^i = \ddot{\theta}^i \mathbf{i}_3^i \quad (4.11)$$

e usando la 4.8, il vettore accelerazione angolare del punto P^i può essere scritto nella forma più familiare :

$$\mathbf{a}^i = \ddot{\mathbf{R}}^i + \alpha^i \times \mathbf{u}^i + \omega^i \times (\omega^i \times \mathbf{u}^i) \quad (4.12)$$

dove $\ddot{\mathbf{R}}^i$ è l'accelerazione dell'origine del sistema di riferimento locale. Il termine $\alpha^i \times \mathbf{u}^i$ rappresenta la componente tangenziale dell'accelerazione del punto P^i rispetto ad O^i . Questa componente ha modulo $\ddot{\theta}^i$ ed è diretto perpendicolarmente sia al vettore α^i che al vettore \mathbf{u}^i . Il termine $\omega^i \times (\omega^i \times \mathbf{u}^i)$ è la componente normale dell'accelerazione di P^i rispetto ad O^i . Questa componente ha modulo $(\dot{\theta}^i)^2 u^i$ ed è diretta da P^i a O^i .

4.3 Dinamica

Le equazioni dinamiche che governano il moto dei corpi rigidi possono essere sistematicamente ottenuti dalle equazioni delle particelle ipotizzando che il corpo rigido sia costituito da un gran numero di particelle. Si può dimostrare che il movimento tridimensionale di un corpo rigido non vincolato può essere descritto utilizzando sei equazioni; tre equazioni sono associate con la traslazione del corpo rigido, e tre equazioni sono associate con la rotazione del corpo. Se un sistema di riferimento baricentrico solidale al corpo viene utilizzato, le equazioni traslazionali sono chiamate equazioni di Newton, mentre le equazioni rotazionali sono chiamate equazioni di Eulero. Le equazioni di Newton-Eulero che sono espressi in termini di accelerazioni e forze che agiscono sul corpo possono essere usate per descrivere un moto rigido arbitrario. Nel caso particolare di moto piano, le equazioni di Newton-Eulero si riducono a tre equazioni scalari che possono essere scritte, per il corpo i nel sistema multi-body, come :

$$\left. \begin{aligned} m^i \mathbf{a}^i &= \mathbf{F}^i \\ J^i \ddot{\theta}^i &= \mathbf{M}^i \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

dove m^i è la massa totale del corpo rigido, \mathbf{a}^i è un vettore a due dimensioni che definisce l'accelerazione assoluta del centro di massa del corpo, \mathbf{F}^i è il vettore delle forze agenti sul centro di massa del corpo, J^i è la matrice d'inerzia rispetto al centro di massa, θ^i è l'angolo che definisce l'orientamento del corpo ed \mathbf{M}^i è il momento angolare agente sul corpo. La scelta del centro di massa come origine del sistema di coordinate solidale al corpo, porta a notevoli semplificazioni nella forma delle equazioni dinamiche. Come risultato di tale scelta del sistema di riferimento, le equazioni di Newton-Eulero non hanno alcun accoppiamento delle inerzie tra le coordinate di traslazione e quelle di rotazione del corpo rigido. Tale disaccoppiamento delle coordinate diventa più difficile quando corpi deformabili sono considerati. È stato dimostrato che la forma della matrice di massa del corpo rigido può essere semplificata se l'origine del riferimento del corpo è collegato al centro di massa del corpo stesso. Pertanto, per semplicità e per eliminare l'accoppiamento inerziale tra la traslazione e la rotazione del corpo, l'origine del riferimento solidale al corpo rigido è spesso collegato al centro di massa del corpo stesso. In questo caso, la matrice di massa del corpo rigido i può essere scritto come :

$$\mathbf{M}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{RR}^i & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

e l'energia cinetica può essere scritta come :

$$T^i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{R}}^{iT} \mathbf{m}_{RR}^i \dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\theta}^{iT} \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \dot{\theta}^i \quad (4.15)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}}^{iT} & \dot{\theta}^{iT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{RR}^i & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}}^i \\ \dot{\theta}^i \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Il lavoro virtuale di tutte le forze applicate esternamente che agiscono sul corpo può essere scritto come :

$$\delta \mathbf{W}^i = \mathbf{Q}_e^{iT} \delta \mathbf{q}^i \quad (4.17)$$

dove \mathbf{Q}_e^i è il vettore delle forze generalizzate e $\delta \mathbf{q}^i$ è la variazione virtuale nel vettore di coordinate generalizzate. Il lavoro virtuale della 4.17 può essere scritto in un forma partizionata come :

$$\delta \mathbf{W}^i = [(\mathbf{Q}_R^i)_e^T \quad (\mathbf{Q}_\theta^i)_e^T] \begin{bmatrix} \delta \mathbf{R}^i \\ \delta \theta^i \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

dove $(\mathbf{Q}_R^i)_e$ e $(\mathbf{Q}_\theta^i)_e$ sono i vettori di forze generalizzate associate, rispettivamente, con la traslazione e rotazione del sistema di riferimento solidale al corpo. Vincoli cinematici tra diversi componenti del sistema multi-body possono essere scritti nella seguente forma vettoriale :

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0} \quad (4.19)$$

dove \mathbf{C} è il vettore delle equazioni di vincolo linearmente indipendenti, t è il tempo, e \mathbf{q} è il vettore totale delle coordinate generalizzate del sistema multi-body costituite da :

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_r^{1T} & \mathbf{q}_r^{2T} & \dots & \mathbf{q}_r^{n_b T} \end{bmatrix}^T \quad (4.20)$$

in cui n_b è il numero totale dei corpi nel sistema multi-body. Dopo aver definito l'energia cinetica, il lavoro virtuale, e il vettore di equazioni di vincolo non lineari algebriche che descrivono i giunti meccanici presenti nel sistema possiamo scrivere le equazioni del moto del sistema del corpo rigido i usando l'equazione di Lagrange o il principio di Hamilton come :

$$\mathbf{M}^i \ddot{\mathbf{q}}_r^i + \mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^i}^T \lambda = \mathbf{Q}_e^i + \mathbf{Q}_v^i \quad (4.21)$$

dove \mathbf{M}_i è la matrice di massa, $\mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^i}$ è la matrice Jacobiana di vincolo, λ è il vettore dei moltiplicatori di Lagrange, \mathbf{Q}_e^i è il vettore delle forze applicate

esternamente, e Q_v^i è un vettore velocità quadratico che nasce dalla derivazione della energia cinetica rispetto al tempo e rispetto alle coordinate generalizzate del corpo i . Questo vettore velocità quadratico è dato da :

$$\mathbf{Q}_v^i = -\dot{\mathbf{M}}^i \dot{\mathbf{q}}_r^i + \left(\frac{\partial \mathbf{T}^i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_r^i} \right)^T = [(\mathbf{Q}_R^i)^T \quad (\mathbf{Q}_\theta^i)^T]^T = \left[\mathbf{0}^T \quad -2\bar{\omega}^{iT} \bar{\mathbf{I}}_{\theta\theta}^i \dot{\mathbf{G}}^i \right]^T \quad (4.22)$$

Le equazioni differenziali del moto del sistema multi-body possono quindi essere scritte come :

$$\mathbf{M}^i \ddot{\mathbf{q}}_r^i + \mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^i}^T \lambda = \mathbf{Q}_e^i + \mathbf{Q}_v^i, \quad i = 1, 2, \dots, n_b \quad (4.23)$$

La 4.23 può essere scritta in forma matriciale come :

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_{\mathbf{q}}^T \lambda = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \quad (4.24)$$

dove con \mathbf{q} indichiamo il vettore totale delle coordinate generalizzate del sistema multi-body definita dalla 4.20

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^1 & & & \\ & \mathbf{M}^2 & & \\ 0 & & \dots & \\ & & & \mathbf{M}^{n_b} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{q}}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^1}^T \\ \mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{\mathbf{q}_r^{n_b}}^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e^1 \\ \mathbf{Q}_e^2 \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_e^{n_b} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_v^1 \\ \mathbf{Q}_v^2 \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_v^{n_b} \end{bmatrix}$$

Le equazioni differenziali della 4.24 e il vettore dei vincoli cinematici della 4.19 rappresentano le equazioni differenziali ed algebriche del sistema multi-body vincolato. Queste equazioni dinamiche sono, in generale, non lineari, e una soluzione in forma chiusa è spesso difficile da ottenere. Una procedura per la risoluzione di queste equazioni è la seguente. In primo luogo, si derivi la 4.19 due volte rispetto al tempo per ottenere :

$$\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{C}_t \quad (4.26)$$

$$\mathbf{C}_q \ddot{\mathbf{q}} = -\mathbf{C}_{tt} - (\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\mathbf{C}_{qt} \dot{\mathbf{q}} \quad (4.27)$$

dove \mathbf{C}_t è la derivata parziale del vettore dei vincoli rispetto al tempo. Sia

$$\mathbf{Q}_c = -\mathbf{C}_{tt} - (\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\mathbf{C}_{qt} \dot{\mathbf{q}} \quad (4.28)$$

per cui :

$$\mathbf{C}_q \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}_c \quad (4.29)$$

La 4.24 e la 4.29 possono essere combinate in una unica equazione matriciale

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \\ \mathbf{Q}_c \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

La 4.30 è un sistema di equazioni algebriche che possono essere risolte per il vettore accelerazione $\ddot{\mathbf{q}}$ ed per il vettore dei moltiplicatori di Lagrange. Dato un insieme di condizioni iniziali, il vettore accelerazione può essere integrato per ottenere le velocità e le coordinate generalizzate. Altro modo per descrivere la dinamica di un corpo rigido è quello di utilizzare le equazioni del moto di Newton-Eulero. Precedentemente è stato dimostrato che l'energia cinetica di un corpo rigido i di un sistema multi-body può essere scritta come

$$\mathbf{T}^i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_r^{iT} \mathbf{M}^i \dot{\mathbf{q}}_r^i \quad (4.31)$$

dove la matrice \mathbf{M}^i è data da

$$\mathbf{M}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{RR}^i & \mathbf{m}_{R\theta}^i \\ \mathbf{m}_{\theta R}^i & \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

È stato inoltre rilevato che nel caso particolare in cui l'origine del sistema di coordinate relativo del corpo rigido è rigidamente collegato al centro di massa, la sottomatrice $\mathbf{m}_{R\theta}^i$, e la sua simmetrica, è la matrice nulla e il la matrice di massa del corpo i si riduce a

$$\mathbf{M}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{RR}^i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

L'energia cinetica T^i del corpo rigido può essere scritta in questo caso come

$$T^i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_r^{iT} \mathbf{M}^i \dot{\mathbf{q}}_r^i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{R}}^i \mathbf{m}_{RR}^i \dot{\mathbf{R}}^i + \frac{1}{2} \dot{\theta}^{iT} \mathbf{m}_{\theta\theta}^i \dot{\theta}^i \quad (4.34)$$

Se le forze di vincolo vengono trattate come forze applicate esternamente, allora l'equazione di Lagrange del moto può essere scritta come

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}^i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_r^i} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}^i}{\partial \mathbf{q}_r^i} = \bar{\mathbf{Q}}^{iT} \quad (4.35)$$

dove con $\bar{\mathbf{Q}}^i$ definiamo

$$\bar{\mathbf{Q}}^i = \mathbf{Q}_e^i + \mathbf{F}_c^i \quad (4.36)$$

in cui \mathbf{Q}_e^i è il vettore forze esterne generalizzato e \mathbf{F}_c^i è il vettore delle forze di reazione vincolari.

In sintesi, il moto di un corpo rigido i di un sistema multi-body è governato da sei equazioni differenziali, che possono essere scritte usando le seguenti due equazioni matriciali:

$$\mathbf{m}_{RR}^i \ddot{\mathbf{R}}^i = \bar{\mathbf{Q}}_R^i \quad (4.37)$$

$$\bar{\mathbf{I}}_{\theta\theta}^i \bar{\alpha}^i = \bar{\mathbf{F}}_{\theta}^i - \bar{\omega}^i \times (\bar{\mathbf{I}}_{\theta\theta}^i \bar{\omega}^i) \quad (4.38)$$

L'equazione 4.37 è una equazione matriciale costituita da tre equazioni scalari relative alle forze e alle accelerazioni del centro di massa del corpo rigido. La 4.37 si chiama equazione di Newton. La 4.38, invece, definisce l'orientamento per un determinato insieme di momenti F_{θ}^i . Questa equazione matriciale comprende anch'essa tre equazioni scalari e si chiama equazione di Eulero. La 4.37 e la 4.38 insieme sono chiamate le equazioni di Newton-Eulero e possono essere combinate in una equazione matriciale come

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_{RR}^i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{I}}_{\theta}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{R}}^i \\ \bar{\alpha}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Q}}_R^i \\ \bar{\mathbf{F}}_{\theta}^i - \bar{\omega}^i \times (\bar{\mathbf{I}}_{\theta\theta}^i \bar{\omega}^i) \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

dove $\bar{\alpha}^i$ è il vettore accelerazione angolare del corpo rigido i .

4.4 Moto Vincolato

Nei sistemi multi-body, il moto dei corpi è limitato a causa del sistema di giunti meccanici quali coppie rotoidali, sferiche, giunti prismatici o traiettorie specificate. Poiché sei coordinate sono necessarie al fine di identificare la configurazione di un corpo rigido nello spazio, $6 \times n_b$ coordinate sono richieste per descrivere il moto di n_p corpi non vincolati. Giunti meccanici o traiettorie specificate riducono la mobilità di un sistema perché il moto dei singoli corpi non è più indipendente. Giunti meccanici e traiettorie di movimento specificate possono essere descritti matematicamente utilizzando un insieme di equazioni lineari algebriche di vincolo. Supponendo che queste equazioni di vincolo sono linearmente indipendenti, ogni equazione vincola un moto possibile del sistema. Pertanto, il numero di gradi di libertà del sistema è definito come il numero di coordinate del sistema meno il numero

di equazioni di vincolo indipendenti. Per un sistema ad n_b corpi rigidi con n_c equazioni di vincolo indipendenti, il numero di gradi di libertà del sistema (DOF) è dato da:

$$DOF = 6 \times n_b - n_c \quad (4.40)$$

Quest'ultima viene definita come il criterio di Kutzbach. Se un insieme di coordinate vengono utilizzate in uno spazio cartesiano per descrivere il moto di due corpi, cinque vincoli cinematici devono essere imposti al fine di consentire il movimento solo lungo un asse. Questi vincoli cinematici possono essere formulati utilizzando un insieme di equazioni algebriche che implicano che la traslazione relativa tra i due corpi lungo due assi perpendicolari all'asse del moto e le rotazioni relative tra i due corpi devono essere zero. Allo stesso modo, in caso di giunto rotoidale, che consente solo la rotazione relativa tra i due corpi attorno ad un asse definito dall'asse del giunto stesso verranno richiesti cinque equazioni di vincolo: tre equazioni che vincolano la traslazione relativa tra i due corpi, e due equazioni che limitano la rotazione relativa tra i due corpi al solo asse del giunto di rotazione. In caso di moto planare in cui gli spostamenti del corpo possono essere rappresentati in uno spazio cartesiano bidimensionale, sono solo tre le coordinate che sono necessarie per descrivere la configurazione del corpo. Per cui un insieme di corpi n_b non vincolati nello spazio bidimensionale è completamente definito utilizzando $3 \times n_b$ coordinate. Per cui per un sistema di n_b corpi vincolati in uno spazio bidimensionale, il numero dei gradi di libertà possono essere determinati utilizzando il criterio di Kutzbach.

$$DOF = 3 \times n_b - n_c \quad (4.41)$$

dove n_c è il numero di equazioni di vincolo che rappresentano i giunti meccanici nel sistema così come traiettorie specificate. Si può verificare che un giunto rotoidale nel piano può essere descritto nello spazio cartesiano utilizzando due equazioni algebriche di vincolo poiché il giunto ha un solo grado di libertà che consente la rotazione relativa tra i due corpi comuni a questa articolazione. Allo stesso modo, un giunto prismatico in movimento planare può essere descritto in una forma matematica utilizzando due equazioni algebriche di vincolo che consentano solo la traslazione relativa tra i due corpi lungo l'asse del giunto prismatico. Nel sistema mostrato in figura 4.5, un disco rotola su una superficie senza scivolare. In questo caso la traslazione del centro di massa e il movimento di rotazione del disco non sono indipendenti. Pertanto, il moto relativo tra il disco e la superficie può essere descritto utilizzando un solo grado di libertà. In caso di rotolamento

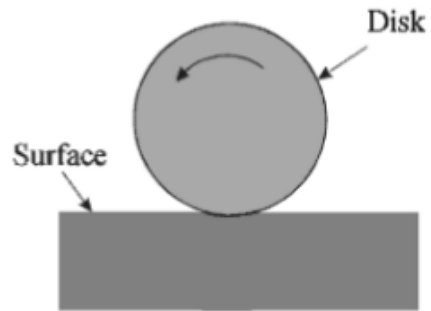


Figura 4.5: Disco che rotola su un piano

e slittamento tra disco e superficie, allora la definizione e la rotazione del disco sono indipendenti e il movimento relativo tra il disco e la superficie devono essere descritti usando due gradi di libertà.

Capitolo 5

Sviluppo di una procedura per identificazione e controllo di veicoli autonomi

In questo capitolo viene esposta prima il background teorico sulla identificazione e controllo di sistemi dinamici lineari. Mentre nel secondo paragrafo, viene esposta la procedura teorica sperimentale per l'identificazione e il controllo di un rover di laboratorio denominato UGV (Unmanned Ground Vehicle), costituito da uno chassis realizzato in Metilmetacrilato, ha due ruote motrici fisse azionate da due motoriduttori DC comandati da drive e dotate di encoders digitali incrementali. Sul retro è posizionata una ruota libera basculante su cui è stato più agevole mettere a punto la metodica di identificazione e controllo proposta. La metodica è stata, di seguito implementata sul veicolo cingolato UTV (Unmanned Tracked Vehicle) oggetto del lavoro di tesi. Infine nel paragrafo 3 viene riportato le conclusioni e i possibili sviluppi della tecnica proposta.

5.1 Generalità sulla dinamica, identificazione e controllo di sistemi meccanici lineari

5.1.1 Equazioni del moto

Le equazioni del moto per un sistema lineare (o linearizzato) sono un insieme di n_2 equazioni differenziali del secondo ordine, dove n_2 è il numero di coordinate indipendenti. L'equazione del moto di un generico sistema può

avere la seguente forma :

$$M\ddot{x}(t) + R\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (5.1)$$

dove M , R e K sono le matrici massa, smorzamento e rigidità del sistema, rispettivamente, $x(t)$, $\dot{x}(t)$ e $\ddot{x}(t)$ sono i vettori spostamento, velocità e accelerazione e $F(t)$ rappresenta la funzione forzanti esterne. D'altra parte, se la risposta del sistema dinamico viene misurata da m quantità nel vettore uscita $y(t)$, allora le equazioni di uscita del sistema possono essere scritte in forma matriciale come segue

$$y(t) = C_a\ddot{x}(t) + C_v\dot{x}(t) + C_dx(t) \quad (5.2)$$

dove C_a , C_v e C_d sono matrici di influenza dell'uscita per l'accelerazione, velocità e spostamento, rispettivamente. Queste matrici di influenze dell'uscita descrivono la relazione tra i vettori $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ e il vettore delle uscite $y(t)$. Sia $z(t)$ è il vettore di stato del sistema

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

se le eccitazioni del sistema dinamico vengono misurate dalle r quantità in input nel vettore di ingresso $u(t)$, le equazioni del moto e l'insieme delle equazioni di uscita possono essere entrambe riscritte rispettivamente in termini del vettore di stato come segue

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A_c z(t) + B_c u(t), \\ y(t) &= C z(t) + D u(t) \end{aligned} \quad (5.4)$$

dove A_c rappresenta la matrice di stato, B_c è matrice di influenza degli attuatori, C è la matrice di influenza dei sensori e D è la matrice delle inerzie. Queste matrici possono essere calcolate nel seguente modo

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}R \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$C = [C_d - C_a M^{-1}K \quad C_v - C_a M^{-1}R], \quad D = C_a M^{-1}B_2 \quad (5.6)$$

dove B_2 è una matrice di influenza caratterizzata dalle informazioni e il tipo di ingressi secondo la seguente equazione

$$F(t) = B_2 u(t) \quad (5.7)$$

Nel caso, molto comune, in cui l'uscita misurata è una combinazione lineare dello stato, l'equazione dell'uscita diventa

$$y(t) = Cz(t) \quad (5.8)$$

Le equazioni 5.4 e 5.8 costituiscono un modello a tempo continuo nello spazio degli stati di un sistema dinamico [26]. D'altra parte, si consideri un sistema a tempo discreto nello spazio degli stati di un sistema dinamico

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Az(k) + Bu(k), \\ y(k) &= Cz(k) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Poiché i dati sperimentali sono discreti in natura, le equazioni 5.9 costituiscono la base per l'identificazione di sistema lineari, dinamici tempo-invarianti. La matrice di stato A e la matrice di influenza degli attuatori B del modello a tempo discreto possono essere calcolati dalle matrici analoghe A_c , B_c del modello a tempo continuo campionando il sistema ad intervalli regolari di tempo

$$A = e^{A_c \Delta t}, \quad B = \int_0^{\Delta t} e^{\Delta c \tau} d\tau B_c \quad (5.10)$$

dove Δt è la costante di intervallo.

5.1.2 LQ Optimal Regulation

In un controllo ottimo si cerca di trovare un controllore che fornisca prestazioni migliori rispetto a qualche dato indice di prestazione [20]. Ad esempio, il controllore che utilizza la minore quantità di energia di regolazione del segnale di portare l'uscita a zero. In questo caso l'indice di prestazioni sarebbe l'energia di regolazione del segnale. Quando il modello matematico del sistema da controllare è lineare e le funzioni che compaiono nell'indice di prestazioni sono forme quadratiche, abbiamo un problema di controllo ottimo LQ. Considerando il modello stazionario lineare, stabilizzabile e rilevabile

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Az(k) + Bu(k), \\ y(k) &= Cz(k) \end{aligned} \quad (5.11)$$

il problema della regolazione (LQ) in tempo infinito è quello di determinare la legge di controllo di feedback ottimale che minimizza l'indice di prestazione

$$J_{LQ} := \sum_{k=1}^{\infty} [y^T(k)Qy(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (5.12)$$

dove $Q = Q^T > 0$ e $R = R^T$ ed il termine

$$\sum_{k=1}^{\infty} u^T(k) R u(k) \quad (5.13)$$

corrisponde all'energia del segnale di controllo e il termine

$$\sum_{k=1}^{\infty} y^T(k) Q y(k) \quad (5.14)$$

corrisponde all'energia dell'uscita controllata. La soluzione è data dalla legge di controllo

$$u(k) = -Kz(k), \quad K := R^{-1}B^T S \quad (5.15)$$

dove la matrice S è simmetrica semidefinita positiva, soluzione unica dell'equazione algebrica di Riccati (ARE). Le matrici Q e R possono essere scelte applicando la seguente regola

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } y_i^2} \quad (5.16)$$

$$R_{ii} = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } u_i^2} \quad (5.17)$$

5.1.3 Modello dell'Osservatore

Come visto precedentemente la soluzione ottimale di un problema di regolazione (LQ), consiste nel feedback delle variabili di stato del modello del sistema da controllare. Spesso, tuttavia, le variabili di stato del sistema da controllare non sono direttamente misurabili, ma abbiamo a disposizione un numero di misure limitate, per questo motivo, diventa essenziale nella progettazione di un sistema di controllo, l'uso di un dispositivo di stima dello stato, detto osservatore. Questi dispositivi consentono di ottenere una stima delle variabili di stato dalla conoscenza di ingressi e misure disponibili passate del sistema. L'osservatore dello stato deve avere per essere accettabile, due proprietà fondamentali. Se indichiamo con $z(k)$ il vero stato, con $\hat{z}(k)$ lo stato stimato e con $e(k) := z(k) - \hat{z}(k)$ l'errore di previsione, possiamo dire che la stima deve essere asintoticamente stabile nel senso che la stima dell'errore deve convergere a zero per $k \rightarrow \infty$ e con dinamica arbitraria nel

senso che la velocità di convergenza deve poter essere scelta arbitrariamente dal progettista. Consideriamo il seguente sistema lineare, stazionario e completamente osservabile

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Az(k) + Bu(k), & z(k=1) &= z_0 \\ y(k) &= Cz(k) \end{aligned} \quad (5.18)$$

Supponiamo che il sistema sia di ordine n ed il vettore di uscita sia di dimensione m con $m < n$, e che z_0 stato iniziale non sia noto. La nostra intenzione è quella di costruire uno stimatore di stato per il sistema 5.18 del tipo

$$\hat{z}(k+1) = A\hat{z}(k) + Bu(k) + G[y(k) - C\hat{z}(k)], \quad \hat{z}(k=1) = \hat{z}_0 \quad (5.19)$$

utilizzando cioè l'errore sulla stima per modificare il comportamento dell'osservatore. L'equazione di cui sopra può anche essere scritta come

$$\hat{z}(k+1) = (A - GC)\hat{z}(k) + Bu(k) + Gy(k), \quad \hat{z}(k=1) = \hat{z}_0 \quad (5.20)$$

Si noti che la stima dello stato iniziale deve essere fatta sulla base delle informazioni che si hanno a disposizione sul sistema e in assenza di questi, la scelta ovvia è $\hat{z}_0 = 0$. Dalle equazioni 5.18 e 5.19 è possibile ricavare il seguente modello della stima dell'errore

$$e(k+1) = (A - GC)e(k), \quad e(k=1) = z_0 - \hat{z}_0 \quad (5.21)$$

Da cui segue che, per rendere efficace la stima, si devono scegliere gli autovalori di $A - GC$ con parte reale negativa sufficientemente inferiore alla parte reale degli autovalori della matrice A . Poiché il sistema 5.18 è completamente osservabile è sempre possibile determinare la matrice K in modo tale che la matrice $A - GC$ abbia autovalori arbitrari. La matrice G è detta matrice di guadagno dell'osservatore. La velocità con cui si riduce l'errore dipende dalla dinamica dell'osservatore e quindi è maggiore quanto più è grande (in modulo) la parte reale (negativa) degli autovalori della matrice $A - GC$. Rendere l'osservatore più pronto significa anche aumentare la larghezza di banda e quindi rendere la stima più sensibile al rumore inevitabilmente presente nelle misure disponibili.

5.1.4 Feedforward Control

La caratteristica del controllore ad anello aperto è che non utilizza il feedback per determinare se la sua uscita ha raggiunto l'obiettivo desiderato

dall'ingresso. Ciò significa che il sistema non osserva l'uscita dei processi che si sta controllando. Di conseguenza, un vero e proprio sistema a ciclo aperto non può impegnarsi in apprendimento automatico e, inoltre, non può correggere eventuali errori. Inoltre non può compensare i disturbi del sistema. Un controllore ad anello aperto è spesso usato in processi semplici per la sua semplicità e basso costo, in particolare nei sistemi in cui il feedback non è critico. Un esempio tipico di una lavatrice convenzionale, per cui il tempo di lavaggio della macchina è completamente dipendente dal giudizio e stima dell'operatore umano. Generalmente, per ottenere un controllo adattativo è necessario alimentare l'uscita del sistema a ingressi del controllore. Questo tipo di sistema è chiamato a circuito chiuso. Ad esempio, un sistema di irrigazione, programmato per accendersi ad orari prestabiliti potrebbe essere un esempio di un sistema ad anello aperto se non misura l'umidità del terreno come una forma di feedback. Anche se la pioggia si riversa giù sul prato, il sistema di irrigazione si attiverà nei tempi previsti, sprecando acqua. I motori passo-passo sono spesso utilizzati per il controllo ad anello aperto della posizione. Un motore passo-passo ruota ad un numero di posizioni fisse, secondo la sua costruzione interna. L'invio di un flusso di impulsi elettrici ad esso lo farà ruotare esattamente del numero proporzionale di passi, da cui il nome. Tali motori sono spesso utilizzati per il controllo di semplici macchine robotiche o per esempio per la testina di stampa a getto d'inchiostro delle comuni stampanti. Lo svantaggio del controllo ad anello aperto, nel caso delle stampanti, è che non si ha modo di rilevare gli errori e la macchina continua a correre leggermente fuori regolazione, fino al reset. Per questo motivo, i robot più complessi e macchine utensili utilizzano servomotori anziché motori passo-passo, che incorporano encoder e controllori ad anello chiuso. Il controllo ad anello aperto è utile per i sistemi ben definiti dove il rapporto tra ingresso e lo stato risultante può essere modellato da una formula matematica. Ad esempio determinare la tensione da alimentare ad un motore elettrico che aziona un carico costante, al fine di ottenere una velocità desiderata sarebbe una buona applicazione di controllo ad anello aperto. Se il carico non è prevedibile, invece, la velocità del motore può variare in funzione del carico e della tensione, ed un controllore ad anello aperto sarebbe pertanto insufficiente a garantire il controllo della velocità in maniera ripetibile. Un sistema di controllo che ha solo comportamento feed-forward risponde al suo segnale di controllo in modo predefinito senza tenere conto di come il carico reagisce, rispetto ad un sistema che ha anche un feedback, che regola l'uscita per tenere conto di come influisce il carico, e di come il carico stesso possa variare in modo imprevedibile. Il controllo in

open-loop o in feed-forward viene anche chiamato balistico, perché una volta che un segnale di controllo è stato generato, non può essere ulteriormente regolato. Qualsiasi aggiustamento correttivo deve essere effettuato per mezzo di un nuovo segnale di controllo. In figura 5.10 è stato riportato il modello multi-body creato del veicolo cingolato mediante un programma CAD che si vuole rendere autonomo. Per valutare la legge di controllo in anello aperto è stata effettuata una analisi dinamica inversa in cui l'ingresso è rappresentato dalla legge oraria e dalla traiettoria che il veicolo deve sostenere ed in uscita le velocità o le coppie delle ruote motrici vengono valutate. Per effettuare l'analisi inversa è necessario definire l'ambiente in cui il veicolo si trova ed in particolar modo, le proprietà del piano su cui si muove. Una volta realizzato il cad, definito i vincoli e le proprietà del suolo si è proceduto ad effettuare una serie di analisi dinamiche inverse per differenti traiettorie. In figura 5.1

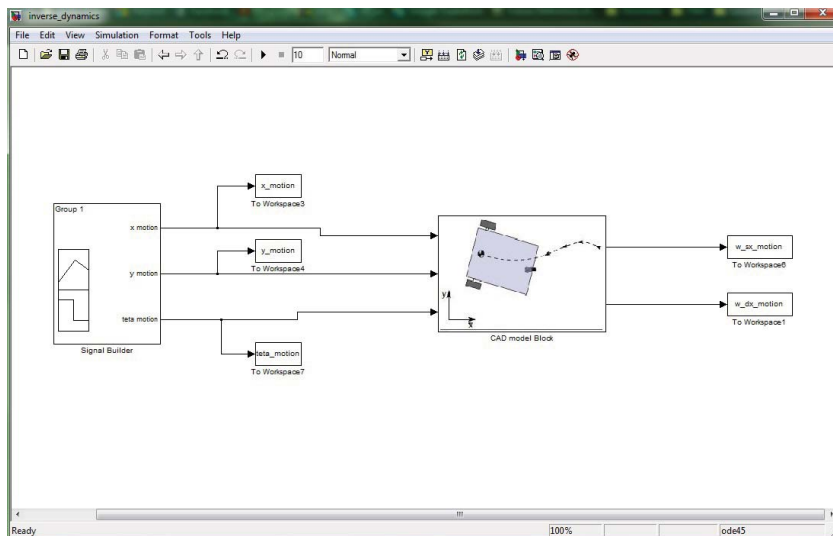


Figura 5.1: Analisi Dinamica Inversa con Matlab

è stato riportato l'algoritmo messo a punto in ambiente Simulink di Matlab per effettuare l'analisi dinamica inversa. Nella figura è possibile notare il blocco *cad model block* che viene creato in ambiente CAE e rende possibile la simulazione dinamica del sistema multi-body in ambiente Simulink. Sulla sinistra invece vengono definite le leggi orarie e la traiettoria che si vuole che il veicolo percorra. Infine sulla destra le uscite del sistema, costituite

SVILUPPO DI UNA PROCEDURA PER IDENTIFICAZIONE 170 E CONTROLLO DI VEICOLI AUTONOMI

da coppie o funzioni di velocità che le ruote motrici devono sviluppare per far effettuare al veicolo la traiettoria voluta. A titolo di esempio in figura

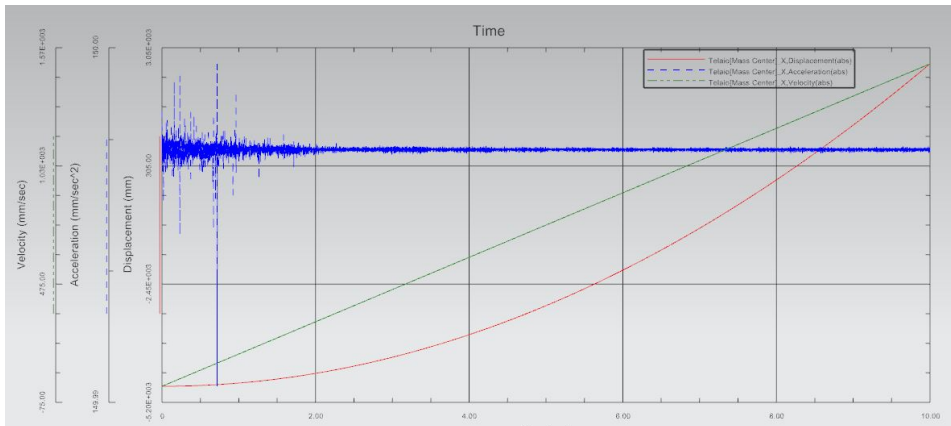


Figura 5.2: Legge Oraria per Analisi Dinamica Inversa - Traiettoria Rettilinea

5.2 è stata riportata una semplice legge oraria utilizzata per far effettuare al modello multi-body una traiettoria rettilinea. Effettuata una analisi dinamica inversa, tramite i sensori posizionati sul veicolo ed in particolare sui due pignoni del mezzo cingolato è stato possibile acquisire i valori di velocità angolare necessarie per percorrere tale traiettoria. Tali risultati sono riportati nelle figure 5.3.

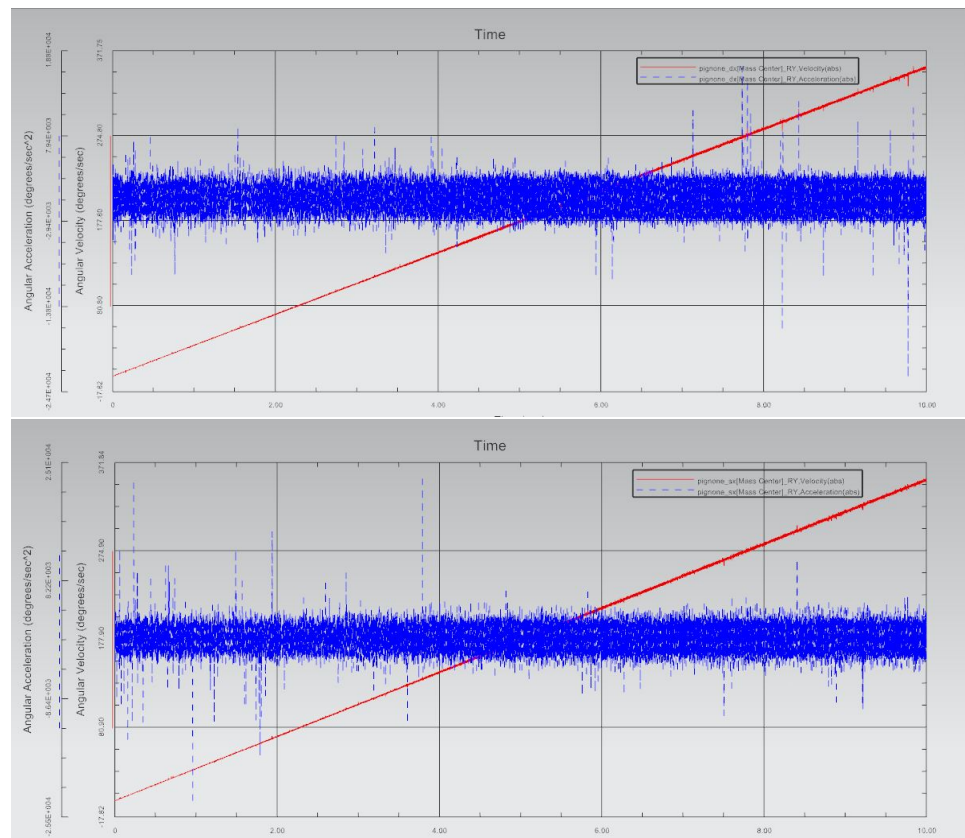


Figura 5.3: Letture Sensori sui Pignoni Destro e Sinistro

5.2 Identificazione e Controllo dell'UGV

Per mettere a punto la procedura riportata in figura 1.2, si è deciso di testare la procedura stessa su un piccolo UGV, Unmanned Ground Vehicle, disponibile in laboratorio e riportato in figura 5.4(a). In figura 5.5 è riportato

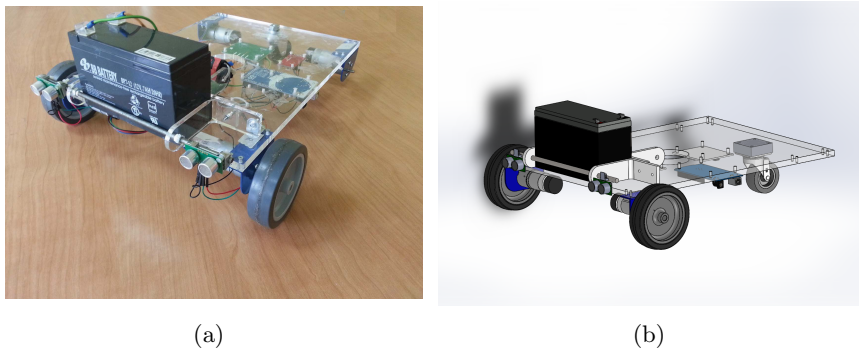


Figura 5.4: UGV, Unmanned Ground Vehicle e modello multi-body



Figura 5.5: Hardware di bordo dell'Unmanned Ground Vehicle

l'hardware di bordo dell'UGV. In particolare il microcontrollore di bordo è costituito dalla scheda Arduino Mega2560. In figura sono poi mostrati sia il kit per la propulsione che parte della sensoristica di cui è dotato il rover

ed in particolare i sensori ad ultrasuoni SRF05. In figura 5.4(b) invece è stato riportato il modello multi-body dell'UGV. Una volta creato il modello si è provveduto a ricavare la legge di controllo in anello aperto per una determinata traiettoria di riferimento costituita dai due segnali di tensione (tensione applicata ai motori). Tale legge è riportata in figura 5.6 dove è stata riportata anche la lettura degli encoder presenti nei due motoriduttori. Per le analisi effettuate sono stati riportati in tabella 5.1 i valori utilizzati per definire il campo di forza e l'attrito presente tra ruota e piano. Tali valori saranno poi utilizzati anche per la simulazione dell'UTV. Noti quindi sia l'ingresso che l'uscita, tramite la procedura di identificazione N4SID, (Numerical algorithms for Subspace State Space System IDentification), è stato possibile ricavare un modello linearizzato del rover nello stato spazio [25, 23, 22, 21, 24]. Di seguito sono state riportate le matrici di stato ottenute per l'UGV.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -4.740e-05 & 2.665e-06 & -3.708e-05 \\ -0.0005266 & 1.001 & -0.01689 & 0.0006557 \\ 0.001857 & 0.01783 & 0.9946 & -0.01416 \\ 0.001423 & 0.003359 & 0.008817 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$B = \begin{bmatrix} -1e-07 & -4.574e-08 \\ 2.537e-05 & -5.01e-05 \\ -1.4e-05 & -2.524e-05 \\ 0.0001159 & -4.996e-05 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1.263e+05 & -461.7 & 4.65 & -2.088 \\ 9.051e+04 & 663.9 & -3.721 & -0.5209 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Il periodo di campionamento dei segnali di ingresso e di uscita è $T_s = 0.01$ s. La procedura di identificazione restituisce anche la matrice G definita matrice di guadagno dell'osservatore.

$$G = \begin{bmatrix} 2.215e-06 & 1.565e-06 \\ -3.385e-04 & 4.117e-04 \\ 0.0049 & -0.0067 \\ -0.0108 & -0.0037 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Ottenuto quindi un modello linearizzato si è passati a calcolare la matrice K

Modello di contatto	
Rigidezza	10^5 N/mm
Esponente rigidezza	2
Smorzamento materiale	10 N s/mm
Parametri d'Attrito	
Coefficiente statico	0.3
Velocità stiction	0.01 mm/s
Coefficiente dinamico	0.2
Velocità di attrito	0.1 mm/s

Tabella 5.1: Proprietà del terreno e parametri del campo di forze per il contatto cingolo-piano

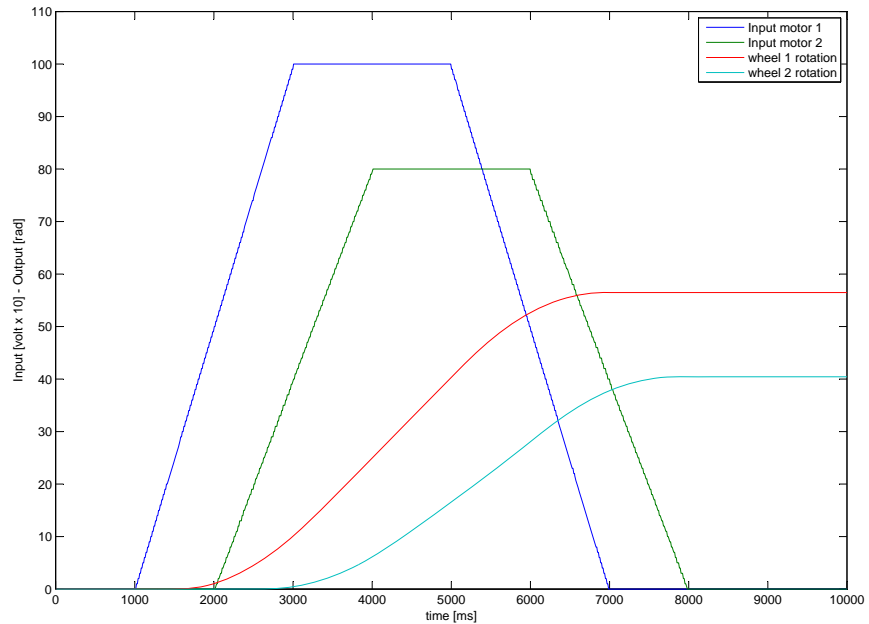


Figura 5.6: Segnali di ingresso ed uscita per l'identificazione del modello

guadagno di controllo che è stata calcolata applicando un controllo ottimale LQR in cui le matrici di penalizzazione Q e R , dell'indice di prestazione, sono i seguenti:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{100^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{100^2} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{100^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{100^2} \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

In questo modo, si ottiene la seguente matrice di guadagno del controllo K :

$$K = \begin{bmatrix} -1.5119e + 05 & 444.8 & -81.875 & 136.34 \\ 1.2608e + 04 & -650.39 & 87.417 & -9.2388 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

In figura 5.7 sono state riportate le leggi di controllo calcolate sia in anello aperto che in anello chiuso grazie al controllo ottimo. In figura 5.8 invece oltre alla traiettoria di riferimento riportata in nero, sono state riportate le traiettorie percorse dall'UGV sia nel caso di controllo in feedforward riportata in blu che nel caso di controllo in feedback sommato al controllo in feedforward riportata in rosso.

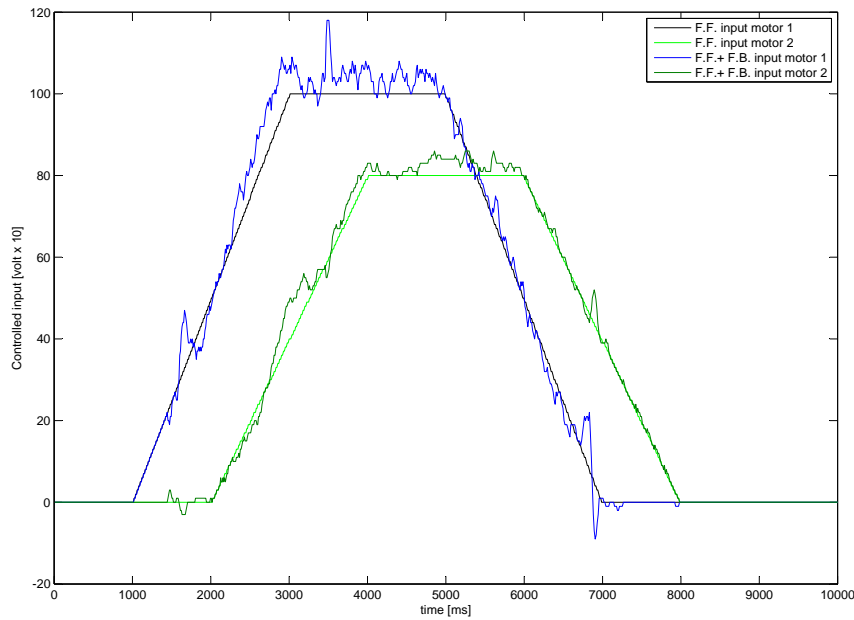


Figura 5.7: Leggi di controllo FFW e FFW + FB

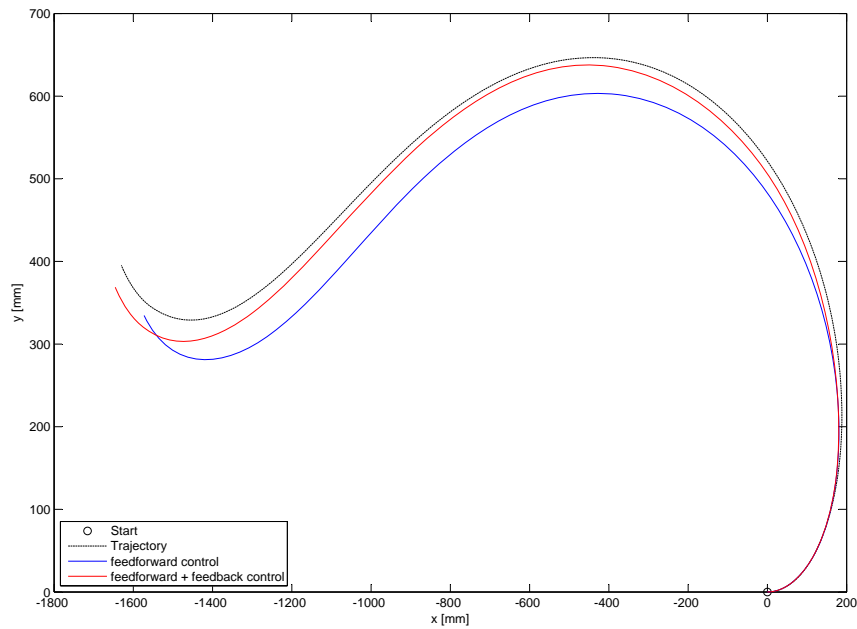


Figura 5.8: Traiettorie percorse dall'UGV

5.3 Identificazione e Controllo dell'UTV

Visti i risultati ottenuti per l'UGV si è passati a testare tale procedura sul veicolo cingolato UTV

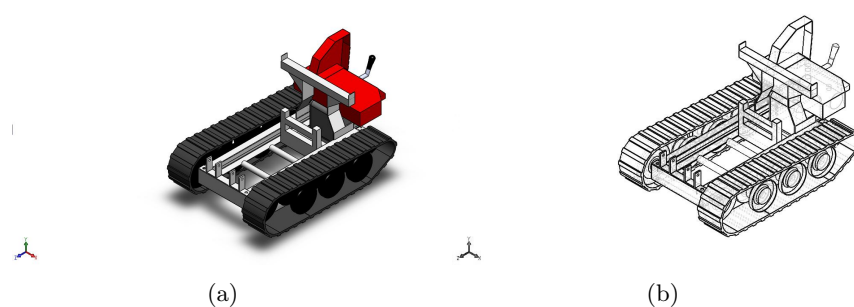


Figura 5.9: Modello Multi-body dell'UTV, Unmanned Tracked Vehicle

In primo luogo, un modello multi-body del sistema è stato costruito ed è stato riportato in figura 5.9. Mediante una analisi dinamica inversa, sono state calcolate le leggi da dare in ingresso ai motori. Sperimentalmente si è verificato che il controllo feedforward produceva una uscita leggermente diversa rispetto alla legge di moto programmata, a causa del rumore e delle ipotesi semplificative del modello. Successivamente sono stati identificati le

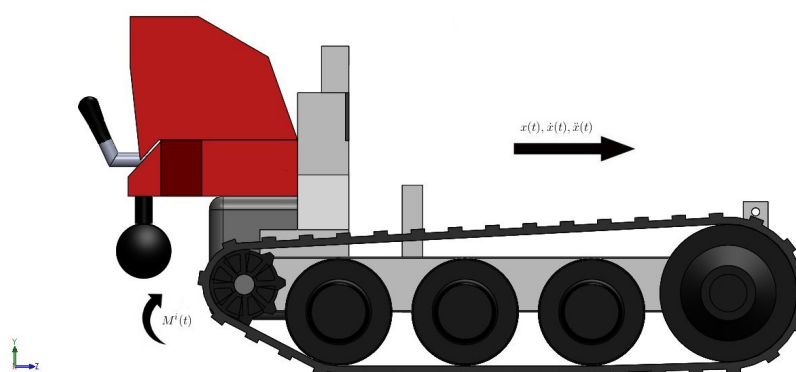


Figura 5.10: Modello Multi-body dell'Unamanned Tracked Vehicle

matrici di stato del modello linearizzato, sulla base dei dati di ingresso e

di uscita sperimentali. La procedura di identificazione ha fornito il modello nello spazio degli stati del sistema ed ha fornito anche la matrice dell'osservatore G (vedi eq. 5.19). Infine, è stata costruita la legge di controllo feedback che ha il compito di compensare gli errori tra l'uscita reale e l'uscita programmata. Sia l'osservatore e che la legge di controllo (feedback + feedforward) sono state caricate sul microcontrollore di bordo . Di seguito vengono riportati i risultati delle procedure di identificazione e di controllo .

5.3.1 Identificazione

L'algoritmo N4SID ci permette di ricavare le matrici di stato A , B , C , D e la matrice dell'osservatore G . Queste matrici sono state costruite tenendo in considerazione il periodo di campionamento dei segnali di ingresso e uscita $T_s = 0.001s$. Oltre ai segnali di ingresso e di uscita, opportunamente costruiti, l'algoritmo N4SID ha bisogno di conoscere l'ordine del modello. Per ottenere, quindi, una rappresentazione prossima al sistema che vogliamo rappresentare, è consigliabile testare l'ordine che si è ipotizzato per accertarsi della bontà del sistema identificato. Di seguito sono stati riportati due modelli linearizzati del sistema multi-body aventi ordine diverso. Le matrici di stato riportate di seguito dalla 5.30 alla 5.33 sono state ottenute per un ordine del modello $n = 4$. Mentre le matrici di stato riportate dalla 6.3 alla 6.2 sono state valutate per un ordine del modello $n = 8$.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9.115e-05 & 2.324e-05 & 9.167e-06 \\ 0.0001764 & 1 & 0.00143 & 0.0004842 \\ 0.0002623 & -0.001574 & 1 & -3.162e-05 \\ -0.0002415 & -0.0004118 & -5.811e-05 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

$$B = \begin{bmatrix} 3.89e-07 & -2.633e-07 \\ 1.724e-05 & 1.71e-06 \\ -2.16e-05 & 2.43e-05 \\ 1.85e-05 & -3.031e-05 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

$$C = \begin{bmatrix} 79.56 & -3.086 & -0.8127 & -0.0003829 \\ -15.99 & -8.349 & 0.119 & -0.002082 \\ -127.6 & 1.922 & -7.438 & 0.0002413 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9.109e-05 & 2.309e-05 & 9.801e-06 & 1.965e-05 & -9.822e-06 & -2.428e-06 & 3.491e-06 \\ 0.0001766 & 1 & 0.00143 & 0.0004857 & -6.964e-05 & -3.366e-05 & -1.182e-05 & -4.733e-06 \\ 0.0002636 & -0.001574 & 1 & -4.255e-05 & -0.000369 & -9.226e-05 & -2.404e-05 & 8.672e-05 \\ -0.0002256 & -0.0004144 & 1.964e-05 & 0.9969 & 0.004804 & 0.06036 & 0.03071 & 0.03254 \\ 0.00142 & -2.079e-05 & 0.004244 & -0.0131 & 0.9469 & 0.03946 & -0.1641 & 0.0451 \\ 0.001665 & -0.0008579 & -0.00259 & 0.04569 & 0.05705 & 0.02823 & -0.03006 & -0.07529 \\ 0.005489 & -0.000982 & 0.01003 & -0.02753 & -0.1539 & -0.001489 & 0.4968 & 0.1032 \\ -0.008541 & 0.003084 & -0.003678 & 0.04752 & -0.05882 & -0.2222 & -0.3517 & 0.1276 \end{bmatrix}$$

(5.34)

$$C = \begin{bmatrix} 79.56 & -3.086 & -0.8127 & -0.0003829 & 0.0009604 & 2.336e-05 & -0.0003272 & 9.028e-06 \\ -15.99 & -8.349 & 0.119 & -0.002082 & 8.86e-05 & -0.0001138 & -0.0001304 & -9.307e-05 \\ -127.6 & 1.922 & -7.438 & 0.0002413 & -0.0001326 & -7.069e-05 & -5.419e-05 & -9.633e-05 \end{bmatrix}$$

(5.35)

$$B = \begin{bmatrix} 1.606e - 05 & 6.872e - 06 \\ -3.137e - 05 & -0.0001259 \\ -0.0001275 & -7.879e - 05 \\ 0.005891 & 0.1134 \\ -0.2797 & -0.1798 \\ 0.8012 & -0.4196 \\ -0.7597 & -0.6376 \\ -0.6568 & -1.92 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Come si può notare dalle figure 6.7(a) e 6.7(b), l'ordine scelto per identificare il modello deve essere validato. Una volta che si è testato la correttezza delle ipotesi fatte per la scelta dell'ordine del modello, ed ottenuta la matrice di guadagno dell'osservatore, riportata di seguito, si è passati alla fase di progettazione del controllo ottimo.

$$G = \begin{bmatrix} 0.0117 & -0.0084 & 0.0009 \\ -0.0117 & -0.1186 & 0.0096 \\ -0.1510 & 0.0022 & -0.1158 \\ -13.0260 & -58.3347 & 2.1416 \\ 202.4412 & 99.9499 & -6.0281 \\ -12.9496 & 122.2617 & 213.8233 \\ 522.7123 & 392.2141 & -10.7769 \\ -88.0226 & 640.4463 & -254.8243 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

5.3.2 LQR Control

L'obiettivo del controllo è quello di assicurare che le variabili misurate y seguano una legge di moto nota \bar{y} . A questo proposito, al controllo feedforward, alla legge di controllo in feedforward, utilizzata come ingresso per identificare il modello del veicolo, viene aggiunto un feedback compensatore proporzionale alla deviazione dello stato reale (stimato) \hat{z} rispetto a quello desiderato \bar{z}

$$\delta u(k) = -K \delta \hat{z}(k), \quad \text{con} \quad \delta \hat{z}(k) = \hat{z}(k) - \bar{z}(k) \quad (5.39)$$

L'equazione per stimare la deviazione è formalmente identica alla Eq. 5.19 e sfrutta le matrici identificate

$$\delta\hat{z}(k+1) = A\delta\hat{z}(k) + B\delta u(k) + G(\delta y(k) - \delta\hat{y}(k)) \quad (5.40)$$

$$\delta\hat{y}(k) = C\delta\hat{z}(k) \quad (5.41)$$

in cui

$$\delta\hat{y}(k) = \hat{y} - \bar{y} \quad \text{e} \quad \delta y(k) = y - \bar{y} \quad (5.42)$$

La matrice K , guadagno del controllo, è stata quindi calcolata, utilizzando le seguenti matrici di penalizzazione Q ed R , dell'indice di prestazione

$$Q = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

$$R = \begin{bmatrix} 4.0000e-04 & 0 \\ 0 & 4.0000e-04 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

**SVILUPPO DI UNA PROCEDURA PER IDENTIFICAZIONE
182 E CONTROLLO DI VEICOLI AUTONOMI**

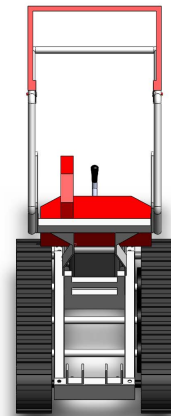
Capitolo 6

Discussione e conclusioni

L'obiettivo della tesi è stata la modellazione dinamica di un veicolo cingolato off-road, e lo sviluppo di una legge di controllo che lo rendesse autonomo. L'obiettivo del controllo, è quello di rendere il veicolo capace di operare in completa sicurezza ed autonomia su terreni con angoli di pendenza massima pari a 20° . Il sistema, denominato UTV (Unmanned Tracked Vehicle),



(a)



(b)

Figura 6.1: Vista frontale

è pensato per il trasporto di merci su terreni sconnessi con forte pendenze e di difficile accesso. La propulsione è garantita dal motore a combustio-

ne interna, riportato in figura 6.2, a quattro tempi EX16D della SUBARU capace di sviluppare una potenza massima di 4.3 Hp a 4000 rpm. La geo-



Figura 6.2: Motore monocilindrico, a benzina, a 4 tempi, raffreddato ad aria SUBARU

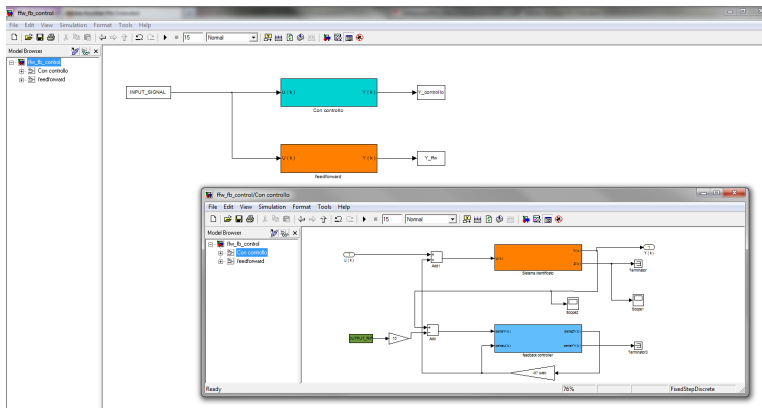


Figura 6.3: Analisi Dinamica Diretta in ambiente Simulink

metria del veicolo con una larghezza di 180 mm, una carreggiata di 670 mm e una lunghezza di impronta di 580 mm garantisce una buona stabilità. La modellazione è stata sviluppata in ambiente Solidworks che integrato con il software SimMechanics della Mathworks ha permesso la realizzazione di un modello multi-body riportato in figura 6.1 ed in figura 6.6. In figura 6.3 è stato riportato il codice Simulink creato per effettuare le simulazioni



Figura 6.4: Attuatore proporzionale per il controllo a distanza di distributori idraulici

dinamiche sul modello multi-body creato precedentemente e per testate le leggi di controllo, in open loop e closed loop, progettate per il modello identificato. Si è proceduto poi, a dotare il veicolo cingolato di un opportuno set di attuatori e di sensori riportati rispettivamente in figura 6.5(a) ed in figura 6.5(d). In particolare, in figura 6.4 è stato riportato il blocco attuatore proporzionale. Le caratteristiche dell'attuatore sono state riportate di seguito.

- comando in CORRENTE (PWM);
- costruzione modulare;
- corsa ± 13 mm (± 20 mm con amplificatore di corsa);
- disponibile fino a 8 funzioni;
- semplicità d'installazione;
- retroazione meccanica;
- funzionamento a bassa pressione con olio minerale;
- interventi di manutenzione rapidi e con costi contenuti.

Le leggi di controllo, definite in simulazione sono state implementate sulla macchina ed in particolare sul microcontrollore ArduinoMega2560 riportato

in figura 6.5(c). Uno stralcio del codice Arduino creato per questa applicazione, derivante direttamente dal linguaggio di programmazione C, è stato riportato di seguito. In particolare è stato riportato il codice per il calcolo della legge di controllo ottimo.

```

#include <MatrixMath.h>

#define n (8) //Dimensione stato x
#define m (2) //numero ingressi u
#define r (3) //numero letture y

float A[n][n]={
{1.9.109e-05, 2.309e-05,9.081e-06, 1.965e-05,-9.822e-06,-2.428e-06,3.491e-06},
{0,0001766, 1, 0.00143,0.0004857,-6.964e-05,-3.366e-05,-1.182e-05,-4.733e-06},
{0.0002636,-0.001574, 1,-4.255e-05,-0.000369,-9.226e-05,-2.404e-05,8.672e-05},
{-0.0002256,-0.0004144,1.964e-05,0.9969, 0.004804, 0.06036, 0.03071, 0.03254},
{0.00142,-2.079e-05, 0.004244, -0.0131, 0.9469, 0.03946, -0.1641, 0.0451},
{0.001665,-0.0008579, -0.00259, 0.04569, 0.05705, 0.02823,-0.03006, -0.07529},
{0.005489, -0.000982, 0.01003, -0.02753, -0.1539, -0.001489, 0.4968, 0.1032},
{-0.008541, 0.003084, -0.003678, 0.04752, -0.05882, -0.2222, -0.3517, 0.1276}
};
float B[n][m]={
{1.606e-05, 6.872e-06},
{-3.137e-05, -0.0001259},
{-0.0001275, -7.879e-05},
{0.005891, 0.1134},
{-0.2797, -0.1798},
{0.8012, -0.4196},
{-0.7597, -0.6376},
{-0.6568, -1.92}
};
float C[r][n]={
{79.56, -3.086, -0.8127, -0.0003829, 0.0009604, 2.336e-05, -0.0003272, 9.028e-06},
{-15.99, -8.349, 0.119, -0.002082, 8.86e-05, -0.0001138, -0.0001304, -9.307e-05},
{-127.6, 1.922, -7.438, 0.0002413, -0.0001326, -7.069e-05, -5.419e-05, -9.633e-05}
};
float G[n][r]={
{0.0117, -0.0084, 0.0009},
{-0.0117, -0.1186, 0.0096},
{-0.1510, 0.0022, -0.1158},
{-13.0260, -58.3347, 2.1416},
{202.4412, 99.9499, -6.0281},
{-12.9496, 122.2617, 213.8233},
{522.7123, 392.2141, -10.7769},
{-88.0226, 640.4463, -254.8243}
};
float A_ [n][n]={
{0.04758,-0.0353,0.01708,-3.3539e-06,9.267e-06,-1.0985e-05,3.587e-07,2.697e-06},
{0.26545, -0.045,0.07759,0.00023,-4.658e-05,-4.622e-05,-3.0597e-05,-1.4741e-05},
{-2.729,-0.2264,0.01545,-6.7778e-05,-0.000239,-9.66e-05,-7.944e-05, 7.7134e-05},
{ 377.008, -531.3315, 12.287, 0.86993, 0.0227, 0.05417, 0.0189, 0.0274},
{-15276.923, 1470.418, 107.795, 0.2739, 0.7427, 0.04568, -0.08521, 0.05199},
{30274.0435,570.3985, 1565.42, 0.2435, 0.087, 0.0575, -0.006766, -0.04318},
{-36690.1015, 4907.442, 297.980, 0.9918, -0.692, 0.03018, 0.7183, 0.1339},
{-15280.173, 5564.878, -2043.259, 1.408, -0.06481, -0.16528, -0.3108, 0.16349}
};
float K[m][n]={
{0.0705, 0.1294, -0.2065, 4.0245, 0.1632, 0.2312, -0.1897, 0.0353},
{-0.4174, -0.4482, 0.3468, -3.4884, 0.5984, -0.0751, -0.1505, -0.1499}
}; // -Kc

int velSX=0;
int velDX=0;
long t=0;
long tp=0;
long dt=0;
int delta=1000;
float acc=0.1;
long axis_pos[2]={0,0};
float y_ [r]={0,0,0};
float dy [r]={0,0,0};
float dXs [n]={0,0,0,0,0,0,0,0};

```

```

int u[m]={0,0};
float du[m]={0,0};
float L1[n]={0,0,0,0,0,0,0,0};
float L2[n]={0,0,0,0,0,0,0,0};
float L3[n]={0,0,0,0,0,0,0,0};

void setup() {
  //PC
  Serial.begin(38400); //apro la comunicazione con la porta seriale con il PC
  //seriale 2
  Serial2.begin(38400); //apro la comunicazione con la porta seriale2:
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x35); // Resetto gli Encoders delle due ruote lato porta
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x36); // Disattivo il controllo automatico della MD25
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x34); // Setto la modalit\ '{a}'
  Serial2.write(1); //modalit\ '{a}' 1,
  // -128 (Full Reverse) 0 (Stop) 127 (Full Forward).
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x33); // Setto l'accelerazione
  Serial2.write(10); // accelerazione
  //inizializzazione velocit\ '{a}' motri
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x31); // Seleziona la velocit\ '{a}'
  Serial2.write(0); //invio il valore della velocit\ '{a}'
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x32); // Seleziona la velocit\ '{a}'
  Serial2.write(0); //invio il valore della velocit\ '{a}'
}

//-----
void Encoders(long pos[]){
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x25); // Richiedo i dati dall'Encoder
  while(Serial2.available()<8); // Aspetto gli 8 Byte
  pos[1]=Serial2.read()<<24; //pos[1] sx->R
  pos[1]+=Serial2.read()<<16;
  pos[1]+=Serial2.read()<<8;
  pos[1]+=Serial2.read();
  pos[0]=Serial2.read()<<24; //pos[0] dx->B
  pos[0]+=Serial2.read()<<16;
  pos[0]+=Serial2.read()<<8;
  pos[0]+=Serial2.read();
}

//-----
void clacvel(int ant, double dMdx, double dMsx, long temp)
{
  if (temp<delta-ant) velDX=0;
  if (temp<(3*delta-ant)&&temp>(delta-ant)) velDX=dMdx*((acc/2)*(temp-(delta-ant)));
  if (temp<(5*delta-ant)&&temp>(3*delta-ant)) velDX=dMdx*100;
  if (temp<(7*delta-ant)&&temp>(5*delta-ant)) velDX=dMdx*(100-(acc/2)*(temp-(5*delta-ant)));
  if (temp>(7*delta-ant)) velDX=0;
  //
  if (temp<delta) velSX=0;
  if (temp<3*delta&&temp>delta) velSX=dMsx*(acc/2)*(temp-delta);
  if (temp<5*delta&&temp>3*delta) velSX=dMsx*100;
  if (temp<7*delta&&temp>5*delta) velSX=dMsx*(100-(acc/2)*(temp-5*delta));
  if (temp>7*delta) velSX=0;
}

//-----
void imponiVel(int Vsx, int Vdx)
{
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
  Serial2.write(0x31); // Seleziona la velocit\ '{a}'\ '{a}'
  Serial2.write(Vdx); //invio il valore della velocit\ '{a}' B
  Serial2.write(0x00); // Byte di sincronizzazione
}

```

```

Serial2.write(0x32); // Seleziona la velocit\ '{a}
Serial2.write(Vsx); //invio il valore della velocit\ '{a} R
}
//.....
//.....
void loop() {
//-----
tp=t;
dt=millis()-tp;
if(dt<10)
{
delay(10-dt);
}
t=millis();
//-----
clacvel(-1000, 0.8,1,t);
//calcvcl(ritardo dx [ms] , coef. amp. dx , coef. amp. sx , tempo [ms])

Encoders(axis_pos); // [0]->R, [1]->B
calcY_(y_ , t);

dy[0]=axis_pos[0]-y-[0];
dy[1]=axis_pos[1]-y-[1];
Matrix.Multiply((float*)A_ , (float*)dXs,n , n,1 ,(float*)L1);
// (A-G*C)*dXs(k)
Matrix.Multiply((float*)B_ , (float*)du,n , m,1 ,(float*)L2);
//B*du(k)
Matrix.Multiply((float*)G_ , (float*)dy,n , r,1 ,(float*)L3);
//G*dy(k)
dXs[0]=L1[0]+L2[0]+L3[0];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[1]=L1[1]+L2[1]+L3[1];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[2]=L1[2]+L2[2]+L3[2];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[3]=L1[3]+L2[3]+L3[3];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[4]=L1[4]+L2[4]+L3[4];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[5]=L1[5]+L2[5]+L3[5];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[6]=L1[6]+L2[6]+L3[6];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[7]=L1[7]+L2[7]+L3[7];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)
dXs[8]=L1[8]+L2[8]+L3[8];
// dXs(k+1)=(A+G*C)*dXs(k)+B*du(k)+G*dy(k)

Matrix.Multiply((float*)K_ , (float*)dXs,m , n,1 ,(float*)du); //du(k)=-Kc*dXs(k)

u[0]=constrain(velSX+int(du[0]), -127,128);
u[1]=constrain(velDX+int(du[1]), -127,128);

imponiVel(-u[0], -u[1]);

Serial.println(u[0]); // trasmetto i dati alla porta seriale
Serial.println(u[1]); // trasmetto i dati alla porta seriale
Serial.println(axis_pos[0]);
Serial.println(axis_pos[1]);
Serial.println(y_[0]);
Serial.println(y_[1]);
Serial.println(t);
}

```

Mediante una procedura di identificazione N4SID si è ottenuto il relativo modello dinamico identificato. Su tale ultimo modello si è sviluppato una legge di controllo ottima in retroazione al fine di rendere robusto il controllo. In figura 6.7(a) ed in figura 6.7(b) sono state riportate le risposte agli ingressi mostrati in figura 5.6 dei sistemi identificati mediante la procedura N4SID.

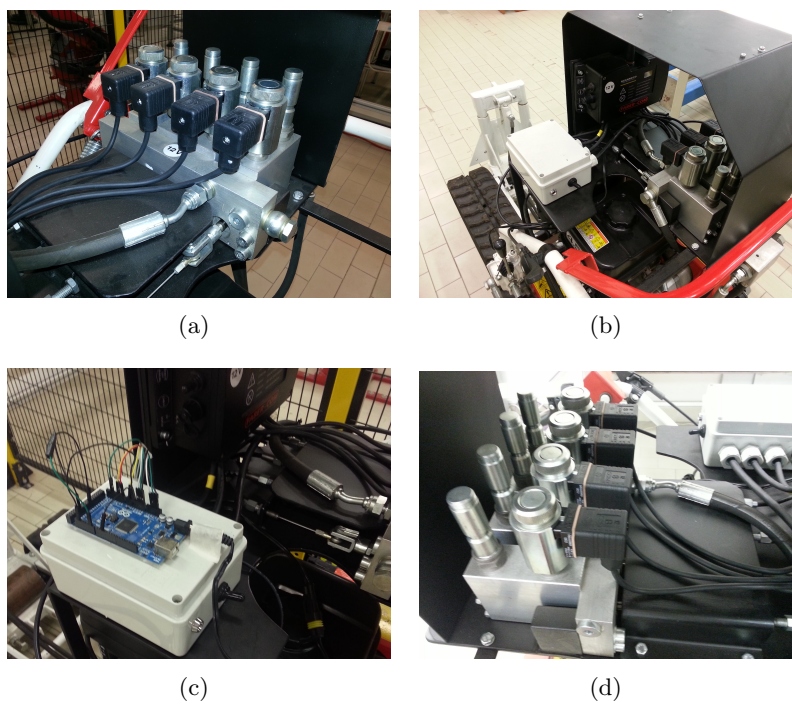
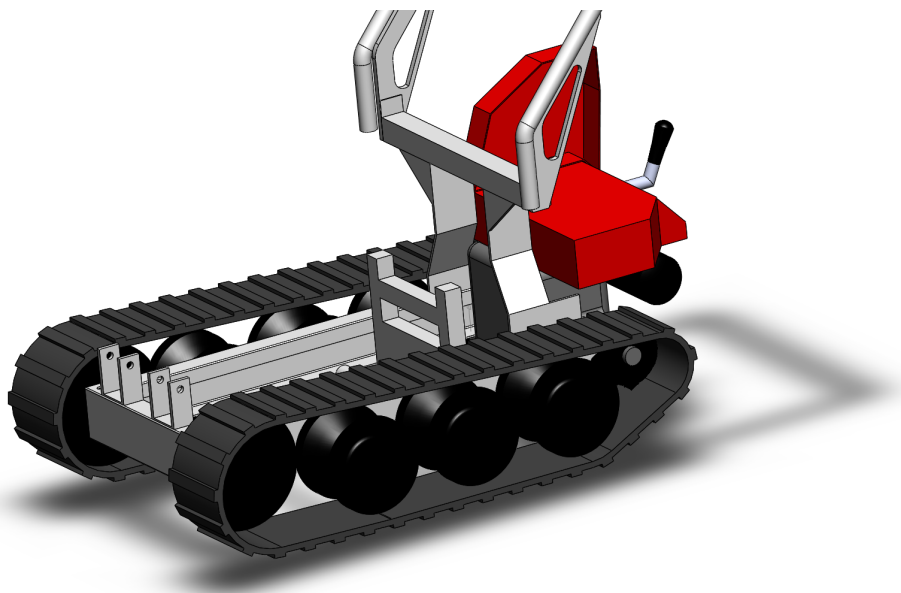


Figura 6.5: Hardware di bordo dell'UTV



(a)



(b)

Figura 6.6: Vista laterale

Come è possibile notare nella prima figura, la risposta è totalmente diversa rispetto alla traiettoria desiderata mentre per una scelta dell'ordine del modello $n = 8$ vediamo un notevole miglioramento della traiettoria percorsa dal sistema identificato. In figura 6.3 è stato riportato il codice Simulink utilizzato per la successiva fase di analisi dinamica diretta in presenza del controllo ottimo progettato precedentemente.

La matrice K guadagno del controllo calcolata mediante un controllo ottimo LQR è stata la seguente :

$$K = \begin{bmatrix} 0.0705 & 0.1294 & -0.2065 & 4.0245 & 0.1632 & 0.2312 & -0.1897 & 0.0353 \\ -0.4174 & -0.4482 & 0.3468 & -3.4884 & 0.5984 & -0.0751 & -0.1505 & -0.1499 \end{bmatrix}$$

Le matrici del sistema identificato sono state riportate di seguito.

$$B = \begin{bmatrix} 1.606e - 05 & 6.872e - 06 \\ -3.137e - 05 & -0.0001259 \\ -0.0001275 & -7.879e - 05 \\ 0.005891 & 0.1134 \\ -0.2797 & -0.1798 \\ 0.8012 & -0.4196 \\ -0.7597 & -0.6376 \\ -0.6568 & -1.92 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9.109e-05 & 2.309e-05 & 9.801e-06 & 1.965e-05 & -9.822e-06 & -2.428e-06 & 3.491e-06 \\ 0.0001766 & 1 & 0.00143 & 0.0004857 & -6.964e-05 & -3.366e-05 & -1.182e-05 & -4.733e-06 \\ 0.0002636 & -0.001574 & 1 & -4.255e-05 & -0.000369 & -9.226e-05 & -2.404e-05 & 8.672e-05 \\ -0.0002256 & -0.0004144 & 1.964e-05 & 0.9969 & 0.004804 & 0.06036 & 0.03071 & 0.03254 \\ 0.00142 & -2.079e-05 & 0.004244 & -0.0131 & 0.9469 & 0.03946 & -0.1641 & 0.0451 \\ 0.001665 & -0.0008579 & -0.00259 & 0.04569 & 0.05705 & 0.02823 & -0.03006 & -0.07529 \\ 0.005489 & -0.000982 & 0.01003 & -0.02753 & -0.1539 & -0.001489 & 0.4968 & 0.1032 \\ -0.008541 & 0.003084 & -0.003678 & 0.04752 & -0.05882 & -0.2222 & -0.3517 & 0.1276 \end{bmatrix}$$

(6.3)

$$C = \begin{bmatrix} 79.56 & -3.086 & -0.8127 & -0.0003829 & 0.0009604 & 2.336e-05 & -0.0003272 & 9.028e-06 \\ -15.99 & -8.349 & 0.119 & -0.002082 & 8.86e-05 & -0.0001138 & -0.0001304 & -9.307e-05 \\ -127.6 & 1.922 & -7.438 & 0.0002413 & -0.0001326 & -7.069e-05 & -5.419e-05 & -9.633e-05 \end{bmatrix}$$

(6.4)

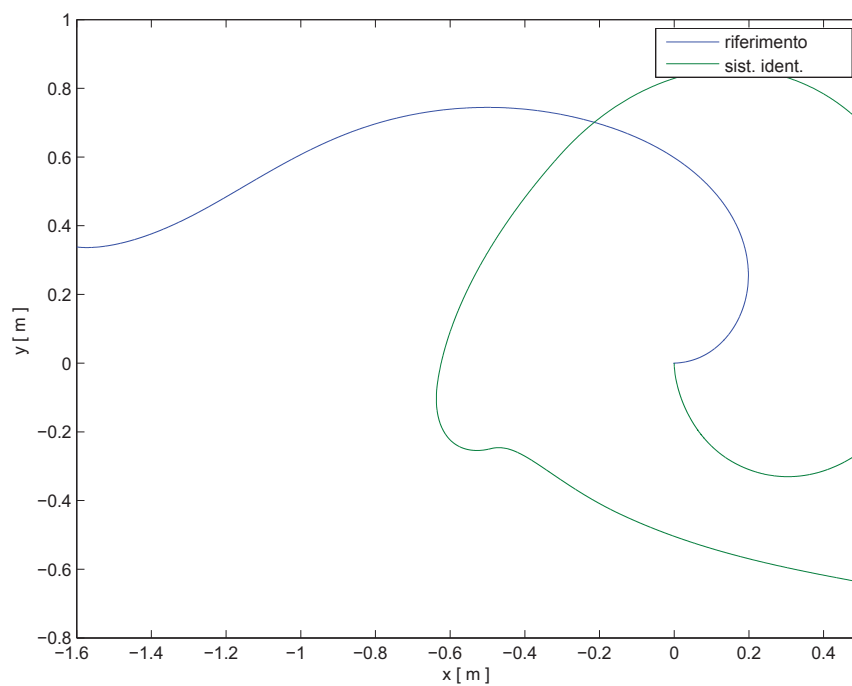
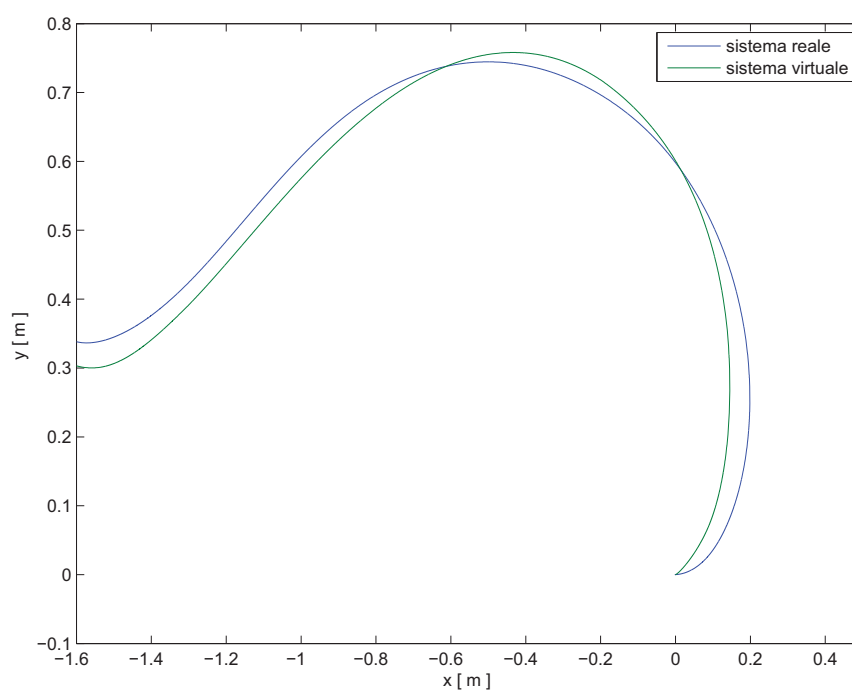
(a) $n=4$ (b) $n=8$

Figura 6.7: Confronto tra le traiettorie percorse dai modelli identificati rispetto alla traiettoria di riferimento

In figura 6.8 sono state riportate le traiettorie effettivamente percorse dall'UTV durante la fase di test. In blu è stato riportato la traiettoria di riferimento scelta per questa simulazione. In verde e rosso sono state riportate le traiettorie percorse dal veicolo cingolato in presenza della sola legge di controllo in feedforward e dalla legge di controllo in feedback sommata alla legge di controllo in feedforward. Dal grafico è evidente il contributo dato dal segnale di controllo in anello chiuso aggiunto al segnale valutato durante l'analisi dinamica inversa al passare del transitorio.

Con questo lavoro di tesi abbiamo voluto testare logiche di controllo per retrofittare un veicolo cingolato in modo da renderlo autonomo.

Per testare tale procedura, è stato utilizzato un UGV, Unmanned Ground Vehicle, da laboratorio a due ruote motrici indipendenti ed una ruota folle bascolante. Tale rover è dotato di un microcontrollore Arduino Mega2560, di due motoriduttori per l'attuazione, un driver per l'azionamento dei motoriduttori e una vasta sensoristica di bordo tra cui menzioniamo sensori ad ultrasuoni per l'individuazione di eventuali ostacoli e di encoders per la determinazione della traiettoria percorsa dall'UGV. Si è realizzato un modello

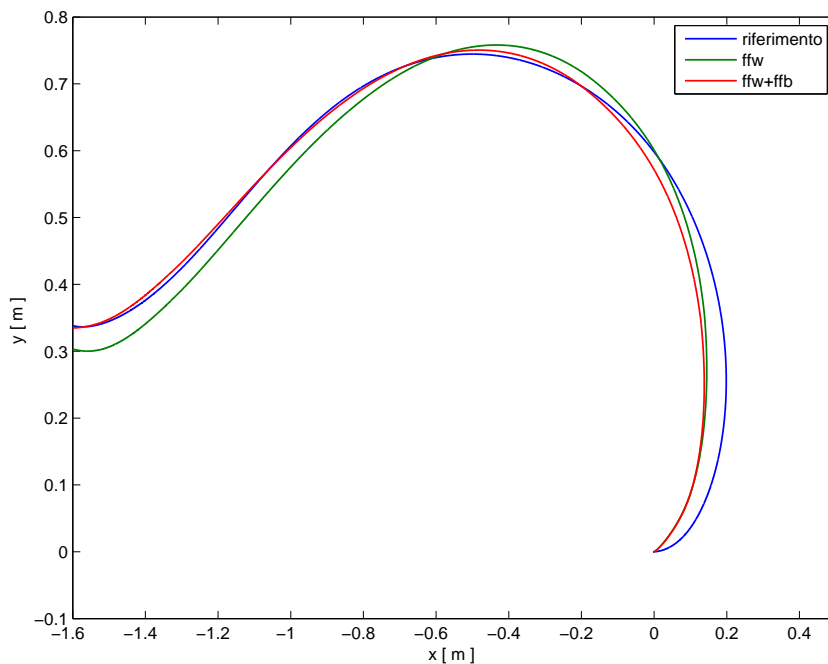


Figura 6.8: Confronto delle traiettorie percorse dall'UTV

multi-body del rover su cui per una determinata traiettoria da percorrere è stata calcolata prima la legge di controllo in anello aperto e poi successivamente, tramite la progettazione di un controllo ottimo, si è valutata la legge di controllo in anello chiuso. Tali leggi di controllo sono state poi implementate sul microcontrollore di bordo dando risultati molto soddisfacenti. È stata quindi applicata tale procedura sulla motocarriola UTV. Una volta realizzato il modello multi-body del veicolo cingolato semplificato e definite le condizioni all'interfaccia tra cingolo e piano, definita la traiettoria di riferimento, si è replicato quanto già fatto sul modello multi-body dell'UGV. La bontà dei risultati, al di sopra delle aspettative, ci spinge a voler testare tale procedura su veicoli dalla dinamica ancora più complessa e nel realizzare modelli multi-body sempre più accurati in modo da migliorare sensibilmente il comportamento del veicolo nel caso di controllo in feedforward.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Domenico Guida, tutor del mio Dottorato di Ricerca, per aver contribuito alla mia crescita sia professionale che personale.

Ringrazio i miei colleghi del laboratorio Carmine Maria Pappalardo e Fabio Nilvetti che mi hanno accompagnato durante questo percorso.

Ringrazio il collega Carlo Addeo con cui ho passato giorni felici in laboratorio.

Vorrei ringraziare mio padre e mia sorella per l'incoraggiamento ed il supporto costante datomi durante questi tre anni ed infine un ringraziamento speciale ad Elvira che mi ha sempre sostenuto dal primo all'ultimo giorno di questo percorso.

Bibliografia

- [1] M. Blundell, D. Harty, *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2004, ISBN-10: 0750651121, ISBN-13: 978-0750651127.
- [2] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2012, ISBN-10: 0080970168 ISBN-13: 978-0080970165.
- [3] D. J. Ewins, S. S. Rao, S. G. Braun, *Encyclopedia of Vibration*. Academic Press, ISBN: 0122270851.
- [4] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*. Springer-Verlag, 2005, ISBN-10: 1441938893 ISBN-13: 978-1441938893.
- [5] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures*. Kluwer Academic Pub, 2003, ISBN-10: 1402009259, ISBN-13: 978-1402009259.
- [6] W. K. Gawronski, *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. Springer-Verlag, 2004, ISBN-10: 0387406492, ISBN-13: 978-0387406497.
- [7] A. E. Bryson, Y. C. Ho, *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Taylor and Francis, 1975, ISBN: 0891162283.
- [8] F. L. Lewis, D. L. Vrabie, V. L. Syrmos, *Optimal Control*. John Wiley and Sons, 2012, ISBN-10: 0470633492, ISBN-13: 978-0470633496.
- [9] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory: An Introduction*. Dover, 2004, ISBN-10: 0486434842, ISBN-13: 978-0486434841.
- [10] D. P. Bertsekas, *Dynamic Programming and Optimal Control*. Athena Scientific, 2005, ISBN-10: 1886529086, ISBN-13: 978-1886529083.

- [11] T. R. Bewley, *Numerical Renaissance: Simulation, Optimization and Control*. Renaissance Press, To be published.
- [12] T. R. Bewley, A Linear Systems Approach to Flow Control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 39:383-417, 2007.
- [13] T. R. Bewley, Flow Control: New Challenges for a New Renaissance. *Progress in Aerospace Sciences*, 37, 21-58, 2001.
- [14] F. Ikhouane, J. Rodellar, *Systems with Hysteresis: Analysis, Identification and Control Using the Bouc-Wen Model*. Wiley-Interscience, 2007, ISBN-10: 0470032367, ISBN-13: 978-0470032367.
- [15] G. Genta, *Vibration Dynamics and Control*. Springer, 2009, ISBN-10: 0387795790, ISBN-13: 978-0387795799.
- [16] D. J. Inman, *Vibration with Control*. John Wiley and Sons, 2006, ISBN-10: 0470010517, ISBN-13: 978-0470010518.
- [17] A. A. Shabana, *Computational Dynamics*. Cambridge, 2010, ISBN-10: 0470686154, ISBN-13: 978-0470686157.
- [18] A. A. Shabana, *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge, 2010, ISBN-10: 0521154227, ISBN-13: 978-0521154222.
- [19] F. Nilvetti, M. C. De Simone, Test-Rig for Identification and Control Applications. *Programme and Proceedings of International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)*, 9-12 September 2013 - Lisbon, Portugal.
- [20] D. Guida, C. M. Pappalardo, Optimal Control Design of an Active Mass Damper with Dry Friction. *International Journal of Mechanical Engineering and Industrial Design (JMEID)*, ISSN: 2280-6407, Volume 2, 2013, 2(4): 27-39.
- [21] F. Nilvetti, M. C. De Simone, Identification and Control of an Unmanned Ground Vehicle. *International Journal of Mechanical Engineering and Industrial Design (JMEID)*, ISSN: 2280-6407, Volume 1, 2013, 1(3): 16-21.
- [22] C. M. Pappalardo, *Dynamics, Identification and Control of Multibody Systems*. Ph.D. Thesis, Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Italy, 2012.

- [23] D. Guida, F. Nilvetti, C. M. Pappalardo, Parameter Identification of a Two Degrees of Freedom Mechanical System. *WSEAS Transactions on International Journal of Mechanics*, ISSN: 1998-4448, Issue 2, Volume 3, 2009, Pages 23-30.
- [24] D. Guida, F. Nilvetti, C. M. Pappalardo, Parameter Identification of a Full-Car Model for Active Suspension Design. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 40, n. 2, pag. 138-148, 2010, ISSN: 1734-8412.
- [25] T. Katayama, *Subspace methods for system identification*. Springer, 2006, ISBN-10: 1852339810.
- [26] Juang, Jer-Nan and Phan, Minh Q, *Identification and control of mechanical systems*. Cambridge University Press, 2001, ISBN 0-521-78355-0.
- [27] Siegwart, Roland and Nourbakhsh, Illah Reza and Scaramuzza, Davide, *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, 2011, ISBN 0-262-19502-X.
- [28] Wong, Jo Yung, *Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour, off-road vehicle performance and design*. Butterworth-Heinemann, 2009, ISBN: 978-0-7506-8561-0.