UNIVERSITÀ DI PISA

MECCANICA DEI ROBOT

MARCO GABICCINI

Anno accademico	2020/21
CdS	INGEGNERIA ROBOTICA E DELL'AUTOMAZIONE
Codice	276II
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
MECCANICA DEI ROBOT	ING-IND/13	LEZIONI	60	MARCO GABICCINI

Obiettivi di apprendimento

Conoscenze

Il corso si propone di fornire agli allievi le nozioni fondamentali e gli strumenti necessari per l'analisi, la verifica e la modellazione dettagliata di robot industriali (seriali e paralleli), robot mobili (su ruote o zampe) e veicoli, intesi nella loro più ampia accezione. I robot oggetto del corso sono in generale sistemi fisici controllati da un processore digitale, dotati di capacità sensoriali e di intervento sull'ambiente, con caratteristiche di elevata autonomia e di facile interazione con l'uomo. Al termine del corso, lo studente avrà:

- conoscenze avanzate inerenti la modellistica ed il controllo di robot seriali;
- conoscenze sulle tecniche e gli algoritmi di pianificazione del moto di robot;
- conoscenze sulle metodologie di modellazione, analisi e progetto di robot paralleli e mani artificiali

Il software in cui vengono svolte le sercitazioni al calcolatore è Wolfram Mathematica [https://www.wolfram.com/]. Alcune esercitazioni possono prevedere l'uso della suite CasADi [casadi.sourceforge.net] in ambiente Python.

Modalità di verifica delle conoscenze

La verifica delle conoscenze avviene attraverso un esame scritto ed un colloquio orale. Lo svolgimento di un progetto sulle tematiche del corso con il software Wolfram Mathematica è facoltativo e viene tenuto in considerazione nella composizione del voto definitivo dell'esame.

Capacità

Al termine dell'insegnamento lo studente saprà:

- Progettare sistemi di controllo per sistemi meccanici e veicoli in presenza di vincoli e di incertezze del modello
- Analizzare le caratteristiche e le proprietà strutturali della dinamica di sistemi meccanici e robotici avanzati
- Utilizzare software di simulazione per sistemi meccanici e robotici

Modalità di verifica delle capacità

Durante il corso le tecniche apprese di pianificazione e controllo verranno applicate su sistemi meccanici e veicoli simulati e/o fisici in attività di esercitazione e laboratoriale, sotto la supervisione dei docenti e dei collaboratori alla didattica

Comportamenti

Al termine del corso gli studenti avranno sviluppato l'attitudine a riconoscere nei problemi applicativi di diversa natura che possono essere loro proposti, le caratteristiche salienti dei sistemi robotici in una accezione ampia del termine, di riconoscere le tecniche più adeguate per studiarne il moto, utili per il controllo, e di applicare gli strumenti di progetto appresi.

Modalità di verifica dei comportamenti

Agli studenti verrà chiesto di proporre argomenti di approfondimento nei quali loro stessi dovranno scegliere i sistemi cui applicare le tecniche apprese. In questo modo, potranno dimostrare di saper estendere l'applicabilità dei metodi ad una classe più generale di problemi che potranno incontrare nella loro vita professionale.

Prerequisiti (conoscenze iniziali)

- Corsi di meccanica di base;
- Conoscenza operativa di algebra lineare;
- Necessità di imparare l'utilizzo di software di analisi e simulazione (Mathematica)

Corequisiti
Nessuno

Prerequisiti per studi successivi
Nessuno

Indicazioni metodologiche
Le lezioni vengono svolte alla lavagna con l'eventuale uso di supporti multimediali per la visione di immagini e video.
Modalità di apprendimento:

- Partecipazione alle lezioni
- Partecipazione a seminari
- Partecipazione alle discussioni
- Studio individuale
- Lavoro di gruppo

Metodologia di insegnamento:

- Lezioni
- Seminari
- Tutorato

Programma (contenuti dell'insegnamento)

1. ESEMPIO DI REGISTRO DELLE LEZIONI TRATTO DALL'A.A. 2019-20
2. Gio 26/09/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) non tenuta: Da recuperare. Non tenuta causa indisponibilità del docente. (MARCO GABICCINI)
3. Ven 27/09/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) non tenuta: Da recuperare. Non tenuta causa indisponibilità del docente. (MARCO GABICCINI)
4. Gio 03/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Presentazione del corso di Meccanica dei Robot. Argomenti del corso, modalità di esame, materiale didattico. Passato, presente e prospettive della robotica. Il ruolo fondamentale della modellistica meccanica nello sviluppo di robot sempre più performanti ed efficienti. (MARCO GABICCINI)
5. Ven 04/10/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Punti, vettori e loro coordinate e componenti in sistemi di riferimento ortonormali. Interpretazione della matrice di rotazione come cambiamento di coordinate e come applicazione lineare che ruota vettori espressi nel medesimo sistema di riferimento. Il gruppo SO(3) e sue proprietà. Matrici ortogonali che non appartengono ad SO(3): le riflessioni. Costruzione della matrice che opera una riflessione rispetto ad un piano. Riepilogo. (MARCO GABICCINI)
6. Gio 10/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Composizione di rotazioni in assi fissi (assemblaggio matrici da dx a sx). Composizione di rotazioni in assi mobili (assemblaggio matrici da sx a dx). Equivalenza delle precedenti composizioni: la trasformazione per congruenza di un tensore del secondo ordine al variare del sistema di riferimento impiegato. (MARCO GABICCINI)
7. Ven 11/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Le 12 parametrizzazione minime di una rotazione ottenute componendo matrici di rotazione elementari. Proprietà delle rotazioni elementari. Dettagli sulla parametrizzazione ZYX (yaw-pitch-roll) e sulla ZYZ. Realizzazione fisica della parametrizzazione ZYX mediante sospensione Cardanica equivalente. Formule di inversione e singolarità di rappresentazione per ZYX e ZYZ con descrizione del loro significato fisico (gimbal lock). Parametrizzazione minima asse-angolo: via diretta (costruzione geometrica) ed indiretta (trasformazione per congruenza di rotazione elementare) per la costruzione della matrice associata. (MARCO GABICCINI)
8. Ven 11/10/2019 16:30-17:30 (*1:0 h*) esercitazione: Esposizione dei contenuti e delle modalità di svolgimento di due progetti tipici di Meccanica dei Robot. 1) Trasformazione di un veicolo RC in scala 1:8 in veicolo a guida autonoma. 2) Sviluppo concettuale, progettazione, realizzazione e controllo di un robot esapode in grado di camminare con molteplici andature e di gestire la ridondanza interna per controllo a cinematica inversa del corpo. (MARCO GABICCINI)
9. Gio 17/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Soluzione del problema inverso mediante invarianti lineari. Singolarità. Parametrizzazione non minima mediante quaternioni unitari. Algebra dei quaternioni per composizione di rotazioni e rotazioni di punti. Vantaggi computazionali dell'uso dei quaternioni rispetto alle matrici di rotazione. Interpolazione fra pose con quaternioni unitari mediante SLERP sulla iper-sfera unitaria in R^4. (MARCO GABICCINI)
10. Ven 18/10/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Trasformazioni di coordinate fra sistemi di riferimento roto-traslati. Perdita della linearità fra le componenti causata dalla presenza della traslazione fra le origini dei sistemi di riferimento. Recupero della linearità mediante introduzione delle coordinate omogenee per vettori posizioni e vettori generici. La matrice di trasformazione omogenea come rappresentazione di roto-traslazioni: il gruppo SE(3). Loro composizione per roto-traslazioni rigide successive mediante prodotto fra matrici. Composizione di roto-traslazioni mediante prodotto di matrici omogenee associate a trasformazioni rigide. Interpretazione della composizione in assi fissi e mobili. Trasformazione per similitudine di una trasformazione omogenea al

variare del sistema di riferimento ortogonale. Svolgimento dell'esercizio n.1 del tema d'esame del 18.09.2019 (calibrazione cinematica di una tavola rotante a due assi). (MARCO GABICCINI)

11. Gio 24/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Dalla struttura cinematica di un robot seriale alla rappresentazione della sua cinematica diretta. La convenzione di Denavit-Hartenberg (D-H) per la parametrizzazione di catene cinematiche seriali. Condizione necessaria e sufficiente sulla scelta di due sistemi di riferimento successivi perché la trasformazione relativa possa essere rappresentata mediante matrice template di D-H. Applicazione alla parametrizzazione di: RR planare. (MARCO GABICCINI)
12. Ven 25/10/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) esercitazione: Esercitazione su Denavit-Hartenberg. Applicazione al: manipolatore RPP (differenti scelte per le terne), polso sferico (differenti configurazioni di riferimento per il polso). Analogia della matrice di rotazione per polso sferico in parametrizzazione di D-H alla Rzyz in assi correnti quando configurazione iniziale del polso è distesa. Necessità di una matrice di offset nel caso configurazione iniziale del polso sia ripiegata. (MARCO GABICCINI)
13. Gio 31/10/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Formalizzazione dei problemi cinematico diretto ed inverso. Approccio numerico alla soluzione del problema cinematico inverso riconducendolo alla soluzione di un sistema di eq.ni algebriche non lineari. Cenni al metodo di Newton-Raphson in più dimensioni. (MARCO GABICCINI)
14. Ven 01/11/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) non tenuta: Lezione non tenuta causa festività di Ognissanti. (MARCO GABICCINI)
15. Gio 07/11/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Approccio analitico (alla Pieper) del problema cinematico inverso per manipolatore seriale con polso sferico. Disaccoppiamento del problema di posizionamento del centro del polso e della orientazione della terna end-effector. Esempio di applicazione al manipolatore antropomorfo con polso sferico. (MARCO GABICCINI)
16. Ven 08/11/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Approccio numerico alla soluzione del problema cinematico inverso riconducendolo alla soluzione di un sistema di eq.ni algebriche non lineari. Cenni al metodo di Newton-Raphson in più dimensioni. Gestione della ridondanza delle variabili e analisi della parametrizzabilità delle soluzioni e sua base teorica: il teorema di Dini in più dimensioni. Applicazione all'RRR planare con sola specifica della posizione dell'end-effector. Richiami su atto di moto 3D di un corpo rigido. Sua rappresentazione mediante twist. Leggi di cambiamento del twist rappresentativo del medesimo atto di moto di un corpo rigido al variare del polo e del sistema di riferimento in cui se ne esprimono le componenti. La trasformazione Ad_g (aggiunta) di una trasformazione omogenea g. Il Jacobiano geometrico per un RRR 3D e suo calcolo dalla sovrapposizione degli effetti dei twist dei giunti (teo. di composizione di moti relativi). (MARCO GABICCINI)
17. Gio 14/11/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Forma minima di un twist rispetto a punti sull'Asse di Mozzi. Richiami di statica del corpo rigido. Rappresentazione mediante wrench. Leggi di variazione di wrench equipollenti al variare del polo e del sistema di riferimento in cui se ne esprimono le componenti. Forma minima del wrench rispetto all'Asse Centrale. Caratterizzazione statica del Jacobiano geometrico. Dualità cineto-statica. (MARCO GABICCINI)
18. Ven 15/11/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: I quattro sottospazi fondamentali di una matrice con particolare riferimento al Jacobiano geometrico. Mutua ortogonalità fra N(J) e Range(J^T) e fra N(J^T) e Range(J). 'Visualizzazione' dell'ortogonalità fra N(J^T) e Range(J) nel caso di RR planare in configurazione singolare (braccio disteso o ripiegato) e sue implicazione pratiche (wrench strutturali in singolarità). (MARCO GABICCINI)
19. Gio 21/11/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Parametrizzazione di catene cinematiche mediante tecniche basate sui gruppi di Lie: global POE e local POE. La mappa esponenziale che collega elementi dell'algebra di Lie (atti di moto) ad elementi del gruppo (trasformazioni finite). Applicazioni. Analisi del formato URDF per la parametrizzazioni di robot in ROS ed analogie con la parametrizzazione local POE. Esempio di applicazione alla parametrizzazione in URDF del robot UR5. (MARCO GABICCINI)
20. Ven 22/11/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Jacobiano geometrico e Jacobiano analitico: analogie e differenze. La non integrabilità della velocità angolare. I due approcci al calcolo della relazione fra la velocità angolare e le derivate temporali degli angoli della parametrizzazione di SO(3) scelta. Algoritmi Closed-Loop Inverse Kinematics (CLIK) per l'inversione della cinematica differenziale di catene cinematiche seriali non ridondanti mediante Jacobiano analitico. Soluzione della eq.ne differenziale risultante mediante discretizzazione numerica ed aspetti critici. (MARCO GABICCINI)
21. Mar 26/11/2019 16:30-18:30 (*2:0 h*) lezione: CLIK mediante utilizzo del Jacobiano geometrico: definizione dell'errore di orientazione mediante parametrizzazione asse-angolo e mediante parte vettoriale del quaternione. Inversione della cinematica differenziale per catene seriali ridondanti. Strategie a priorità di compito e formulazione aumentata. Presentazione di esempio con codice in Mathematica. Manipolabilità in velocità ed in forza di un manipolatore in una data configurazione e loro rappresentazione mediante ellissoidi. L'approccio alternativo basato sulla decomposizione ai valori singolari (SVD) del Jacobiano geometrico. (MARCO GABICCINI)
22. Gio 28/11/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Manipolatori paralleli. Generalità ed esempi: paralleli classici, manipolatori seriali cooperanti, mani per robot, robot su gambe. Configurazione, configurazione minima. Problema cinematico diretto e problema cinematico inverso. Singolarità e biforcazioni. (MARCO GABICCINI)
23. Ven 29/11/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Cinematica differenziale e statica di manipolatori paralleli: Jacobiano J delle gambe, matrice di grasp G, matrice di definizione dei vincoli H fra gambe e coupler nei giunti di collegamente, la forma Pfaffiana delle eq.ni di vincolo fra le velocità ai giunti ed il twist del coupler. (MARCO GABICCINI)
24. Gio 05/12/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Analisi 'strutturale' della soluzione della cinematica differenziale mediante analisi della struttura a blocchi dello spazio nullo della matrice di vincolo. Discussione della esistenza ed unicità della soluzione dell'equilibrio fra wrench esterno, coppie ai giunti delle gambe e forze vincolari fra gambe e coupler, in considerazione anche della presenza di giunti non attuati alle gambe. (MARCO GABICCINI)
25. Ven 06/12/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Breve richiamo di elementi di dinamica del corpo rigido. Le eq.ni cardinali della dinamica del corpo rigido, dette anche eq.ni di Newton-Eulero. Digressione sulle varie forme della seconda cardinale rispetto ad un polo generico e sul significato del momento inerziale. Specializzazione delle eq.ni di Newton-Eulero rispetto al centro di massa. Algoritmo ricorsivo di Newton-Eulero (RNEA) per un manipolatore seriale parametrizzato mediante convenzione di Denavit-Hartenberg. Esempio di applicazione da un manipolatore RR planare. Sull'impiego del RNEA per la soluzione della dinamica inversa e diretta. (MARCO GABICCINI)
26. Mar 10/12/2019 16:30-18:30 (*2:0 h*) lezione: Dalle eq.ni di Lagrange classiche alla forma standard usata in Robotica per manipolatori seriali parametrizzati mediante angoli ai giunti (vettore di configurazione a componenti indipendenti). Dettagli sul calcolo della matrice di inerzia generalizzata e sulla matrice di Coriolis ottenuta mediante i simboli di Christoffel del 1° tipo. Proprietà di anti-simmetria della matrice dB/dt - 2C. (MARCO GABICCINI)
27. Gio 12/12/2019 14:30-16:30 (*2:0 h*) lezione: Dal PLVD alle eq.ni di Lagrange con moltiplicatori di Lagrange per sistemi

parametrizzati mediante vettore configurazione con componenti dipendenti (configurazione ridondante). Esempio: pendolo parametrizzato mediante le coordinate del suo centro di massa. Tipologie di vincolo: vincoli geometrici/differenziali scleronomi/reonomi. Esempio di applicazione a manipolatori paralleli con vincoli di forma Pfaffiana fra le velocità ai giunti delle gambe ed il twist del coupler. Metodi di soluzione delle eq.ni di Lagrange per sistemi vincolati DAE (Differential Algebraic Equations) risultanti. La formulazione aumentata, il metodo delle quasi-velocità e la tecnica di embedding. Caratteristiche e struttura delle eq.ni risultati per i differenti approcci. (MARCO GABICCINI)

28. Ven 13/12/2019 14:30-17:30 (*3:0 h*) lezione: Eq.ni ricorsive di Newton-Eulero (RNEA) per manipolatori seriali mediante formalismo dei gruppi di Lie (parametrizzazione con local POE). (MARCO GABICCINI)
29. Mar 17/12/2019 16:30-18:30 (*2:0 h*) esercitazione: Svolgimento dell'esercizio 1) del tema d'esame del 01.02.2019. Analisi delle proprietà cineto-statiche della presa di un oggetto circolare con un gripper con struttura ad albero. Analisi dei moti labili dell'oggetto, ridondanti del gripper, coordinati. Analisi (e calcolo basi) delle forze interne dell'oggetto, strutturali per il gripper e strutturali ed interne. Ripetizione dei punti salienti nel caso in cui: i) i polpastrelli siano collegati da giunti passivi alle falangi, ii) i polpastrelli siano solidali alle falangi. (MARCO GABICCINI)

Bibliografia e materiale didattico

Dispense del docente.
B. Siciliano - Robotica, 3a edizione, Mc-Graw-Hill
K. M. Lynch & F. C. Park - Modern Robotics, 1a edizione, Cambridge University Press
R. Murray, Z. Li & S. Sastry - A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press

Indicazioni per non frequentanti

Nessuna differenza di programma o di valutazione

Modalità d'esame

L'esame consiste in prove scritte ed orali sulle parti del corso. Entrambe sono articolate in uno o più esercizi da svolgere autonomamente, con l'uso del materiale del corso e di ogni altro materiale ritenuto utile; ed in una o più domande cui rispondere oralmente interagendo con la commissione.
In aggiunta o in alternativa alla prova orale, l'esame consiste nella valutazione dei risultati di approfondimento mediante esposizione di tavole o di progetti proposti e svolti dai candidati.

Stage e tirocini

Possibili su iniziativa indipendente dello studente

Altri riferimenti web

Nessuna

Ultimo aggiornamento 24/09/2020 12:36