



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

MECCANICA DEI ROBOT E DELLE MACCHINE AUTOMATICHE LM

Anno accademico 2014-2015 (ing. M. Troncosi)

Conoscenze e abilità da conseguire

Lo studente acquisisce gli strumenti necessari per effettuare un'analisi funzionale finalizzata alla progettazione di macchine automatiche e di robot. In particolare vengono maturate competenze sia sul versante teorico (analisi cinematica, statica e dinamica di meccanismi complessi; progettazione delle traiettorie; elementi di controllo di posizione dei robot) sia su quello funzionale e applicativo (componenti meccanici; tecnologie per l'attuazione; sensori).

Programma/Contenuti

1. INTRODUZIONE ALL'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE E ALLA ROBOTICA. Introduzione. Macchine seriali e ad architettura parallela: generalità. Caratteristiche generali dei robot. Problematiche di studio della robotica industriale. Robot per applicazioni non industriali (cenni).
2. MATRICI DI TRASFORMAZIONE DELLE COORDINATE. Introduzione. Richiami di cinematica: posizione e orientamento di un corpo rigido e sistemi di riferimento. Matrici per la trasformazione delle coordinate. Rotazioni e traslazioni. Trasformazioni omogenee. Velocità e accelerazione di un corpo rigido.
3. CINEMATICA DEI MECCANISMI SPAZIALI. Introduzione. Modello cinematico di un meccanismo seriale in moto nello spazio. Parametri di Denavit-Hartenberg. Equazioni di chiusura cinematica. Gradi di libertà e gradi di mobilità. Problema cinematico diretto. Problema cinematico inverso: presentazione di alcuni metodi risolutivi. Relazioni differenziali del moto. Modello cinematico del moto istantaneo. Rotazioni e traslazioni infinitesime. Parametrizzazione dell'orientamento. Jacobiano di un meccanismo. Determinazione analitica dello Jacobiano. Calcolo dello jacobiano tramite approccio geometrico. Singolarità cinematiche. Macchine ad architettura parallela (cenni): introduzione, analisi cinematica diretta, problematiche e cenni ai metodi di soluzione.
3. STATICA DEI MECCANISMI SPAZIALI. Introduzione. Equilibrio delle forze e dei momenti. Metodi di analisi: apertura della catena cinematica e PLV. Dualità cinetostatica.
4. DINAMICA DEI MECCANISMI SPAZIALI. Introduzione. Richiami di dinamica del corpo rigido. Formulazione delle equazioni del moto: equazioni di Newton-Euler (algoritmo ricorsivo) ed equazioni di Lagrange (approccio energetico). Interpretazione fisica delle equazioni dinamiche. Problema dinamico diretto. Problema dinamico inverso.



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

5. GENERAZIONE DELLA TRAIETTORIA. Introduzione. Considerazioni generali sulla generazione e descrizione della traiettoria. Generazione della traiettoria nello spazio dei giunti e nello spazio Cartesiano. Programmazione della traiettoria usando il modello dinamico (cenni).

6. SIMULAZIONE CON SOFTWARE PER ANALISI MULTIBODY. Introduzione ai sistemi multibody. Introduzione al software MSC ADAMS. Esercitazioni su analisi cinematica, analisi statica e analisi cinetostatica di meccanismi piani e spaziali. Procedure di ottimizzazione.

Esercitazioni:

- 1) Analisi di posizione inversa del robot PUMA
- 2) Analisi cinematica del Giunto di Cardano
- 3) Elementi di dinamica
- 4) Dinamica di un meccanismo seriale 2R piano
- 5) Dinamica di un meccanismo seriale 2R spaziale
- 6) Dinamica di un meccanismo seriale RP
- 7) Esercitazioni in laboratorio informatico con software ADAMS

Testi/Bibliografia

- Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotica: modellistica, pianificazione e controllo – 3° ed.*, McGraw-Hill, Milano, 2008 [oppure: Sciavicco L. Siciliano B., *Robotica industriale: modellistica e controllo di manipolatori – 2° ed.*, McGraw-Hill, Milano, 2000];
- Cheli F., Pennestri E., *Cinematica e Dinamica dei Sistemi Multibody*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2006;
- Legnani G., *Robotica industriale: cinematica e dinamica di robot seriali e paralleli; movimentazione controllo e programmazione; componenti meccanici, attuatori e sensori; prestazioni, normative e sicurezza*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2003;
- Siciliano & Khatib eds., *Handbook of Robotics*, Springer, New York, 2008;
- Angeles J., *Fundamental of robotic mechanical systems*, Springer-Verlag, New York, seconda edizione 2003;
- Tsai L.W., *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley & Sons, New York, 1999
- Craig J.J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison Wesley, Boston (MA, USA), 1989
- Paul R., *Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press, Cambridge (MA, USA), 1981.



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Metodi didattici

Lezioni frontali in aula.

Modalità di verifica dell'apprendimento

Prova orale.

Strumenti a supporto della didattica

Eventuali visite a laboratori di robotica e/o ad aziende che trattano automazione.

Link ad altre eventuali informazioni

http://diem1.ing.unibo.it/personale/troncossi/didattica_tronco.htm

Orario di ricevimento

Consulta il sito web di [Troncossi Marco](#)



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

PROGRAMMA DI DETTAGLIO

1. INTRODUZIONE ALLA ROBOTICA INDUSTRIALE.

Presentazione del corso. Introduzione all'automazione industriale. Scopi della robotica. Schema funzionale di un robot industriale. Schema a blocchi dello schema di controllo di un robot. Descrizione e utilità dei modelli cinematico e dinamico dei manipolatori. Distinzione robot seriali vs. robot paralleli. Accuratezza e ripetibilità. Calibrazione cinematica (cenni). Cenni ai metodi di controllo. Principali definizioni. Spazio di lavoro raggiungibile e Spazio di lavoro destro. Presentazione delle caratteristiche di un robot industriale (lettura di un data sheet).

2. ANALISI CINEMATICA DEI MANIPOLATORI

Richiami di Meccanica Applicata: gradi di libertà di un meccanismo; formula di Grubler nello spazio e sue particolarità. Analogia fra meccanismo in catena chiusa 7R e manipolatore in catena aperta 6R. Generalità su analisi cinematiche di posizione, velocità e accelerazione di meccanismi spaziali. Problemi di posizione e di orientamento dell'organo terminale di un manipolatore: braccio e polso di un manipolatore seriale. Classificazione dei robot secondo l'architettura del braccio. Forma degli spazi di lavoro. Illustrazione architetture dei polsi sferici, non sferici e ridondanti. Illustrazione architetture dei robot più comuni e loro impiego. Richiami su vettori e matrici. Matrici di rotazione: significato e proprietà. Matrici di rotazione elementari. Composizione di matrici: rotazioni attorno ad assi fissi e ad assi mobili. Non commutatività dell'ordine delle rotazioni finite. Coordinate e trasformazioni omogenee: proprietà. Impiego delle matrici "omogenee" per formulare il modello cinematico di un manipolatore. Trasformazione di similarità. Rappresentazione del prodotto vettoriale tramite matrici antisimmetriche. Teorema di Eulero e formula di Rodriguez. Rotazioni infinitesime: proprietà. Derivata temporale della matrice di rotazione. Formula di Cayley e parametrizzazione dell'orientamento: angoli di Eulero, angoli RPY, asse/angolo (cenni), parametri di Eulero (cenni), parametri di Rodriguez (cenni), coseni direttori (cenni). Soluzione dei problemi di analisi diretto e inverso: soluzioni multiple e singolarità di rappresentazione. Analisi cinematica del corpo puntiforme e del corpo rigido in moto nello spazio: determinazione e significato delle componenti dei vettori velocità e accelerazione. Derivata temporale di un vettore vista da due sistemi di riferimento in moto relativo. Parametri di Denavit-Hartenberg (DH). Formulazione del modello cinematico tramite matrici omogenee (equazioni di chiusura): problemi diretto e inverso. Schema logico che guida l'analisi cinematica di un manipolatore. Soluzione analitica in forma chiusa di sistemi di equazioni. Echelon form (forma scalata) di un sistema: teorema di esistenza delle funzioni implicite (teorema di Dini). Analisi dello Jacobiano di un sistema: esempio (analisi di posizione inversa di un glifo oscillante). Formule solutive notevoli per equazioni con funzioni trigonometriche.

Esercitazione – Analisi cinematica inversa del manipolatore PUMA: determinazione dei parametri DH; analisi di posizione, di velocità e di accelerazione; analisi delle singolarità. Codifica analitica delle soluzioni.

Soluzione "Pieper" di manipolatori 6R dotati di polso sferico. Considerazioni sulle singolarità cinematiche ("cuore" della struttura di un manipolatore) e sulla determinazione di sistemi di 4 equazioni (di legame cinematico) in 4 incognite. Cenni ai metodi degli "invarianti scalari" e delle "open chains". Algoritmi numerici per la soluzione di sistemi di equazioni: illustrazione dell'algoritmo di Newton-Raphson. Derivate temporali delle matrici omogenee. Fattori matrici derivate: determinazione e illustrazione per alcuni tipi di coppie cinematiche. Metodo numerico (di Uicker) per la soluzione dell'analisi inversa di un manipolatore con 6 DoF: analisi di posizione, di velocità, di accelerazione.

Richiami di cinematica del punto e del corpo rigido. Significato fisico di alcune importanti matrici coinvolte nel metodo di Uicker: $E'E^{-1}$; $E''E^{-1}$; Bk. Approccio geometrico per il calcolo dello Jacobiano di manipolatori contenenti coppie rotoidali e prismatiche. Considerazioni su



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Jacobiano "Geometrico" vs. Jacobiano Analitico. Formule generali per la trasformazione di componenti e coordinate omogenee fra due sistemi di riferimento appartenenti a membri generici di un manipolatore. Possibili scelte per la determinazione dello Jacobiano geometrico di manipolatori 6R.

Esercitazione – Analisi cinematica di un manipolatore 3R piano: determinazione dello Jacobiano geometrico e di quello analitico.

Cenni alla formulazione del modello cinematico di meccanismi in catena chiusa (loop singolo, multi-loop e catene ibride) tramite approccio matriciale basato sui parametri di Denavit-Hartenberg. *Esercitazione*: analisi cinematica del giunto di Cardano. Cenni all'analisi cinematica dei robot completamente paralleli (Fully Parallel Robot).

3. ANALISI STATICA DEI MANIPOLATORI

Analisi statica di un manipolatore 6R tramite il Principio dei Lavori Virtuali (PLV): dualità cinetostatica. Analisi statica di robot fully parallel tramite PLV.

4. ANALISI DINAMICA DEI MANIPOLATORI

Richiami di dinamica del corpo rigido: baricentro, quantità di moto, momento angolare, forza d'inerzia, momento delle forze d'inerzia; teorema di trasposizione; derivata del momento angolare; tensore d'inerzia; cambio del sistema di riferimento, Teorema di Huygens-Steiner; energia cinetica, energia potenziale. Calcolo ricorsivo di velocità e accelerazione angolare e dell'accelerazione del baricentro del generico membro del manipolatore seriale. Modello dinamico: descrizione, problema diretto, problema inverso (cinetostatico) e loro impiego.

Riduzione Lagrangiana di forze/coppie e masse/inerzie (per meccanismi con rapporto di riduzione costante). Formulazione del modello dinamico tramite equazioni di Lagrange. Equazioni Cardinali della dinamica. Algoritmo di Newton-Eulero per la formulazione del modello dinamico di un manipolatore seriale. Struttura matriciale del modello dinamico.

Esercitazione – Manipolatore 2R piano a parametri concentrati: determinazione del modello dinamico tramite algoritmo di Newton-Eulero. Considerazioni sui termini di accoppiamento e sul significato fisico di alcuni termini.

Esercitazione – Manipolatore 2R spaziale: determinazione dei parametri di Denavit-Hartenberg e chiusura della catena cinematica; determinazione del modello dinamico tramite approccio energetico Lagrangiano (soluzione completa) e tramite equazioni cardinali della dinamica (impostazione della soluzione): considerazioni sulle equazioni del moto.

Esercitazione – Manipolatore piano RP risolto con approccio matriciale: determinazione del modello dinamico tramite equazioni cardinali della dinamica (con azioni di attrito viscoso e Coulombiano nella coppia P): considerazioni sulle equazioni del moto.

Considerazioni sul momento di inerzia dell'albero motore. Analisi cinetostatica di meccanismi in catena chiusa tramite apertura della catena. Algoritmo numerico per l'analisi dinamica diretta.

5. TRAIETTORIA

Progettazione delle traiettorie nello spazio operativo (cenni) e nello spazio dei giunti.

6. SIMULAZIONI CON SOFTWARE MULTIBODY

Introduzione ai sistemi multibody. Introduzione al software MSC ADAMS. Esercitazioni di analisi cinematica, analisi statica e analisi cinetostatica di meccanismi piani e spaziali.