

DOMANDE CONTROLLO DEI ROBOT

Usa queste domande con saggezza per capire cosa chiede Siciliano in genere. Può anche fare qualche domanda che non sia contenuta in questa lista quindi studiati bene o male anche gli argomenti che non compaiono qui (ma in genere 2 domande su 3 sono una di queste).

CAPITOLO 2/7

1. Differenza tra calibrazione cinematica (pag. 89) ed identificazione parametrica dinamica (pag.285) 2/7
2. Metodi di identificazione dei parametri, calibrazione dei parametri dinamici. 7 (pag.286)
3. Quale calibrazione (cinematica/dinamica) è più semplice? 2/7
4. Dinamica diretta ed inversa complessità computazionale (pag.298) 7
5. Scalatura Dinamica di traiettorie (pag.300) 7
6. Passaggi Modello dinamico nello spazio operativo (pag.302) 7
7. Come si identificano i parametri dinamici se ho solo encoder (pag. 215)? 5/7

CAPITOLO 3

8. Singolarità cinematiche (Pag. 116) 3
9. Problema della ridondanza (pag.121) 3
10. Gestione della ridondanza ed evitamento delle singolarità (124) 3
11. Domande trabocchetto sullo jacobiano (tipo, se cambi la velocità puoi uscire da una singolarità?)
12. Schemi di inversione di cinematica (da Pag. 134), 3
13. Algoritmi clik 3
14. Posso aumentare K indiscriminatamente? 3
15. Dimostrazione algoritmo (trasposta) che funziona con Lyapunov 3
16. Nel caso degli schemi clik che vantaggio ho nell'usare il quaternione unitario? 3
17. Errore di orientamento (pag.138) 3

18. Con la pseudoinversa mi mantengo sempre lontano dalla singolarità? 3
19. Domanda sul motivo per cui si usa l'inversione cinematica con lo jacobiano 3

CAPITOLO 4

20. Come pianifica la traiettoria per orientamento nello spazio operativo? 4
21. Perché non si pianifica l'orientamento con gli angoli di Eulero? (Si considera una matrice di rotazione mutua e da quella o prendo gli angoli di Eulero, o uso asse angolo) 4
22. Ascissa Curvilinea (pag.185) 4

□

CAPITOLO 5

23. Organi di trasmissione 5
24. Che tipo di attuatori si possono usare per i giunti? 5
25. Differenza tra attuatori elettrici e pneumatici 5
26. Quale tipo di azionamento è più versatile dal punto di vista del controllo? 5
27. Riduttore meccanico (pag.209) 5
28. Sensore di forza 5

29. Sensore di coppia all'albero a che serve? 5
30. Sensore di forza a croce di malta 5
31. Come faccio a capire che un sensore è meglio di un altro? A partire dalle matrici di calibrazione come faccio a capire quale sensore è più accurato (pag.222)? 5
32. Sensore di visione con formule 5

CAPITOLO 6

33. Periodo di campionamento da usare a livello servo (domandone a sorpresa?!?!) 6
34. Unità di governo (schema che trovi alla fine del capitolo); 6
35. Architettura hardware/software; 6
36. Schema controllo Robot Hw/Sw 6

CAPITOLO 8

37. Controllo decentralizzato, in tensione e corrente; 8
38. Controllo in velocità non funziona per errori di modello (pag. 315) 8
39. Che vantaggio ho nel misurare direttamente la coppia al giunto (pag. 316)? (Posso fare un controllo indipendente al giunto senza calcolare il modello dinamico) 8
40. Differenze tra controllo robusto e adattativo. 8
41. Superfici di sliding, 8
42. Controllo centralizzato; 8
43. Termine quadratico vs termine lineare
44. Perché non si può usare la legge col segno (nel sistema fisico la coppia è filtrata dal sistema fisico) 8
45. schemi di controllo con anello interno di posizione e di velocità;

Alla fine sono state aggiunte altre domande.

Queste risposte (salvo alcune più di ragionamento) sono un'indicazione ma ti consiglio comunque di studiarti la risposta dal libro.

NB: Non è necessario che tu conosca tutti i passaggi delle dimostrazioni ma almeno i risultati finali. Puoi prendere 30 anche senza poggiare la penna sul foglio ma può chiederti come si scrive qualche formula.

(Appendi le dimostrazioni impossibili tipo come si arriva al modello dinamico nello sp dei giunti con Lagrangiana o Newton andando ad analizzare tutti i contributi dei bracci e motori. Impara solo il modello dinamico e a cosa corrispondono quei termini.)



RISPOSTE

1 Differenza tra calibrazione cinematica (pag. 89) ed identificazione parametrica dinamica (pag.285) 2/7

Tramite la calibrazione cinematica si ricavano stime accurate dei parametri DH a partire da una serie di misure effettuate sulla posa dell'organo terminale del manipolatore, non prevedendo pertanto la misura dei parametri geometrici della struttura. Ha un'elevata precisione utilizzando tecniche di triangolazione vincolando l'organo terminale in posizioni con precisione nota a priori.

La calibrazione è quindi un'operazione che viene eseguita dal costruttore del robot per garantire l'accuratezza dichiarata, l'utente invece può effettuare un'inizializzazione del sistema di misura.

Le tecniche di identificazione si avvalgono delle proprietà di linearità del modello del manipolatore rispetto ad un opportuno insieme di

parametri dinamici. Tali tecniche consentono di ricavare il vettore dei parametri π sulla base di misure effettuate, durante l'esecuzione di opportune traiettorie di moto, sulle coppie ai giunti τ e sulle grandezze che consentono di specificare numericamente la matrice Y (con tecnica ai minimi quadrati).

2 Metodi di identificazione dei parametri, calibrazione dei parametri dinamici. 7 (pag.286)

Supponendo di aver ricavato (durante la traiettoria) le misure di coppie, posizioni, velocità e accelerazioni ai giunti in diversi istanti di tempo, possiamo avere $=h \pi$ considerando un numero elevato di istanti, evitando mal condizionamento di $. Si risolve con minimi quadrati.$

Si può semplificare tutto ricorrendo ad una procedura sequenziale, identificando i parametri sulla base di misure effettuate per un giunto alla volta partendo dall'ultimo e risalendo al primo (presentando eventuali errori).

Non tutti i parametri si possono identificare, in quanto, per qualunque tipo di traiettoria imponibile alla struttura, essi non danno contributo all'equazione del moto, per cui tali colonne della matrice Y risultano nulle e pertanto eliminate nella matrice stessa. Per ovviare a tale problema, per manipolatori con pochi giunti possono essere utilizzate tecniche numeriche che fanno uso della decomposizione in valori singolari della matrice Y . Se non si riesce ad avere il rango pieno, si ricorre ad una inversa ai minimi quadrati smorzata di Y che fornisce soluzioni più o meno accurate in base al peso del fattore di smorzamento.

L'identificazione dei parametri può avvenire anche se presente un carico sconosciuto all'organo terminale, considerando il carico come una modifica strutturale dell'ultimo braccio del manipolatore.

3 Quale calibrazione (cinematica/dinamica) è più semplice? 2/7

Quella dinamica perché tu carichi la traiettoria con molti punti e istanti di tempo e fai partire l'algoritmo. Per

quella cinematica devi cambiare la posa dell'organo terminale e misurarla un sacco di volte e poi fare l'algoritmo. In più se l'errore di scostamento dei parametri DH non è sotto un certo valore devi rifare tutto ancora un'altra volta.

4 Dinamica diretta ed inversa complessità computazionale (pag.298) 7

Il problema della dinamica diretta consiste nel determinare, per $>$, le accelerazioni risultanti ai giunti (t) quando siano assegnate le coppie ai giunti $\tau(t)$ ed eventualmente le forze all'organo terminale, e siano note le posizioni e velocità ai giunti (stato iniziale del sistema).

Il problema della dinamica inversa consiste nel determinare le coppie ai giunti $\tau(t)$ necessarie alla generazione del movimento specificato assegnando le accelerazioni, velocità e posizioni dei giunti (note le eventuali forze all'organo terminale).

La soluzione tramite dinamica diretta è utile in fase di simulazione del manipolatore, consentendo di descrivere il moto in termini delle accelerazioni ai giunti, quando il manipolatore è sottoposto all'azione delle coppie assegnate. Velocità e posizione vengono ricavate con azioni integrative (la formulazione di Newton è migliore computazionalmente rispetto a Lagrange).

La soluzione tramite dinamica inversa risulta utile al fine della pianificazione di traiettorie e dell'implementazione di algoritmi di controllo per un manipolatore. Assegnata la traiettoria ai giunti in termine di posizione, velocità e accelerazione e note le forze agenti sull'organo terminale, la dinamica inversa consente il calcolo delle coppie richieste ai giunti per ottenere il movimento desiderato. Tale calcolo è utile sia ai fini della verifica della fattibilità della traiettoria, sia per la determinazione delle leggi di controllo basate sulla compensazione non lineare.

Anche in questo caso, risulta computazionalmente migliore la formulazione di Newton.

La complessità computazionale, dati n bracci, risulta:

- $O()$ dinamica diretta
- $O()$ dinamica inversa

5 Scalatura Dinamica di traiettorie (pag.300) 7

La scalatura avviene quando una traiettoria non è realizzabile, ad esempio, in relazione alle coppie da utilizzare imponendo una determinata traiettoria al manipolatore che necessita una coppia maggiore di quella massima ammissibile, in questa circostanza si fa una scalatura nel tempo.

Si vuole quindi cercare un metodo di scalatura dinamica automatica, senza rieseguire il calcolo della dinamica inversa.

Si considera quindi una nuova variabile che soddisfa l'equazione:

$$q(t) = (r(t))$$

La scelta più semplice per la funzione di scalatura $r(t)$ è senz'altro la funzione lineare $r(t) = c t$ che mostra come una scalatura lineare nei tempi caratterizzata dalla costante c comporti una scalatura delle coppie secondo il coefficiente di proporzionalità .

Per cui, la durata , così anche i contributi in termini di coppia risultano scalati di un fattore .

In tale modo, tramite un algoritmo ricorsivo, si è in grado di verificare se si sono superati i valori limite consentiti.

6 Passaggi Modello dinamico nello spazio operativo (pag.302) 7

Partiamo dal modello dinamico nello spazio dei giunti, prendendo l'equazione della cinematica differenziale del secondo ordine, l'equazione del modello nello spazio dei giunti si può risolvere tramite Jacobiano geometrico e tramite passaggi algebrici si ritrova l'equazione del modello

7 Come si identificano i parametri dinamici se ho solo encoder (pag. 215)? 5/7

Gli encoder d'impiego più diffuso sono quelli incrementali (costruttivamente più semplici e di costo inferiore). Su tale encoder sono presenti due tracce i cui settori trasparenti e opachi sono in quadratura tra di loro. La presenza di due tracce consente di rivelare il numero di transizioni associate a una certa rotazione angolare, ed anche il verso della rotazione stessa (spesso è presente anche una terza che è in riferimento alla posizione angolare).

Tramite una circuiteria esterna, dalla misura di posizione posso ricavare la misura della velocità generando un impulso ogni transizione secondo tre maniere:

- convertitore frequenza\tensione (analogico).
- misurando (digitale) la frequenza. (elevate velocità di rotazione)
- misurando (digitale) il periodo di campionamento del treno di impulsi. (basse velocità di rotazione)

Per cui, avendo solo encoder, si può ricorrere ad una procedura sequenziale, identificando i parametri sulla base di misure effettuate per un giunto alla volta partendo dall'ultimo e risalendo al primo, ponendo su ogni giunto un encoder.

□

8 Singolarità cinematiche (Pag. 116) 3

Data la trasformazione lineare , configurazioni di per cui diminuisce di rango, sono chiamate **singolarità cinematiche**. Tali configurazioni sono di rilievo perché:

- si ha una perdita di mobilità della struttura in cui non è possibile

imporre leggi del moto arbitrarie

- esistono infinite soluzioni al problema cinematico inverso
- in un intorno della singolarità, velocità ridotte nello spazio operativo possono indurre velocità molto elevate nello spazio dei giunti

Le singolarità possono essere di due tipi:

➤ **Singolarità ai confini dello spazio di lavoro raggiungibile**

quando il manipolatore è completamente steso o ripiegato su sé stesso.

➤ **Singolarità all'interno dello spazio di lavoro raggiungibile**

generalmente causate dall'allineamento di due o più assi di moto, ovvero dall'assunzione di configurazioni particolari da parte dell'organo terminale, problema ben più serio delle precedenti che possono essere evitate.

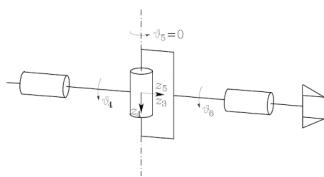


Figura 1 Polso sferico in singolarità

Per strutture complesse è conveniente effettuare un *disaccoppiamento* delle singolarità, definendo due sottocategorie, di polso e della struttura portante, in tal modo il calcolo del determinante risulta semplificato poiché esso è dato dal prodotto dei determinati dei due blocchi sulla diagonale (polso e struttura):

Con condizioni

per le singolarità della struttura portante

per le singolarità di polso

Per le **singolarità di polso**, considerando la Figura 1, la perdita di mobilità è associata al fatto che rotazioni uguali e opposte di non producono alcuna rotazione dell'organo terminale, inoltre il polso non può effettuare nessuna rotazione intorno all'asse ortogonale a .

Per le **singolarità di struttura portante**, guardando la Figura 2, la prima situazione si verifica quando il gomito è tutto steso o ripiegato su sé stesso, ovvero. Prende il nome di singolarità di gomito.

Quando invece il centro del polso si trova lungo l'asse di rotazione di base di , come in Figura 3, allora viene detta singolarità di spalla.

□

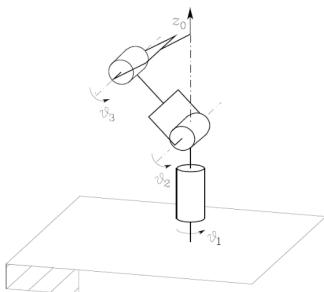


Figura 2 Manipolatore antropomorfo singolarità di gomito

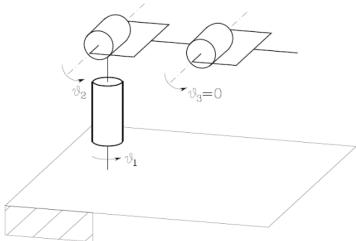


Figura 3 Manipolatore antropomorfo in singolarità di spalla

9 Problema della ridondanza (pag.121) 3

Il concetto di ridondanza è legato al numero n di gradi di libertà, numero m di variabili necessarie a caratterizzare lo spazio operativo, al numero r di variabili dello spazio operativo per specificare il compito. L'equazione cinematica differenziale da considerare può essere formalmente scritta come:

Che può essere caratterizzata in termini dell'immagine e del nullo della

trasformazione, si ha che:

L'immagine di J è il sottospazio $R(J)$ in che individua le velocità dell'organo terminale che possono essere generate dalle velocità di giunto.

Il nullo di J è il sottospazio $N(J)$ in cui appartengono le velocità di giunto che non producono alcuna velocità all'organo terminale.

Se lo Jacobiano è di rango pieno, l'immagine di J ricopre l'intero spazio :

Se invece lo Jacobiano degenera in presenza di singolarità, la dimensione dell'immagine diminuisce ed aumenta quella del nullo.

□

10 Gestione della ridondanza ed evitamento delle singolarità (124) 3

Se il manipolatore è ridondante, lo Jacobiano è una matrice rettangolare bassa e si pone il problema significativo di trovare le soluzioni -ne esisterà più di una- all'equazione .

Un possibile metodo di soluzione è quello di formulare il problema della ricerca di soluzioni in termini di un problema di ottimizzazione vincolato. Una volta assegnata la velocità dell'organo terminale e lo Jacobiano del manipolatore J , si vogliono trovare le soluzioni che soddisfano l'equazione sopra citata e che minimizzano il funzionale di costo quadratico delle velocità

Con W matrice di peso simmetrica e definita positiva. Il problema può essere risolto con Lagrange.

(passaggi matematici dal libro)

Resta da discutere in che modo si specifica il vettore per un'utilizzazione conveniente dei gradi di libertà ridondanti. Una scelta tipica è:

Con e è una funzione obiettivo (secondario) delle variabili di giunto.
Possibili funzioni obiettivo sono:

Misura della manipolabilità: si annulla in corrispondenza di un valore singolare, per cui in tal modo ci si allontana delle singolarità

Distanza dai finecorsa: si cerca di portare ciascuna delle variabili di giunto quanto più vicino al centro della corsa

Distanza da un ostacolo: dove o è il vettore posizione di un punto sull'ostacolo (come il centro) e p sono le posizioni del generico punto sulla struttura, in tale modo si cerca di evitare una collisione.

N.B. per la fisica realizzabilità, , anche se si trova in una situazione singolare, diversamente il sistema non è risolvibile.

11 Domande trabocchetto sullo jacobiano (tipo, se cambi la velocità puoi uscire da una singolarità?)

Si può cambiare la velocità per uscire da una singolarità, ma solo se la si dà direttamente nello spazio dei giunti, lì le singolarità non ci sono perché non entra in gioco l'inversa dello jacobiano. Nello spazio cartesiano vicino alle singolarità il rango dello jacobiano scende, quindi il suo determinante diventa zero (che ti ricordo è usato come denominatore nella formula di inversione di un matrice), quindi usando $qp=J^{-1} \cdot xe$ si ha che non puoi uscire dalla singolarità nemmeno con velocità infinite.



12 Schemi di inversione di cinematica (da Pag. 134), 3

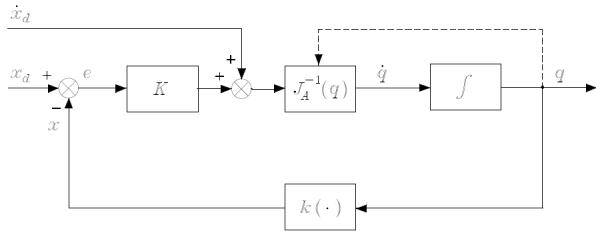


Figura 4 Schema a blocchi dell'algoritmo per l'inversione cinematica con l'inversa dello Jacobiano

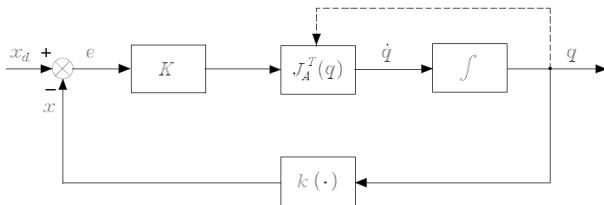


Figura 5 Schema a blocchi dell'algoritmo per l'inversione cinematica con la trasposta dello Jacobiano

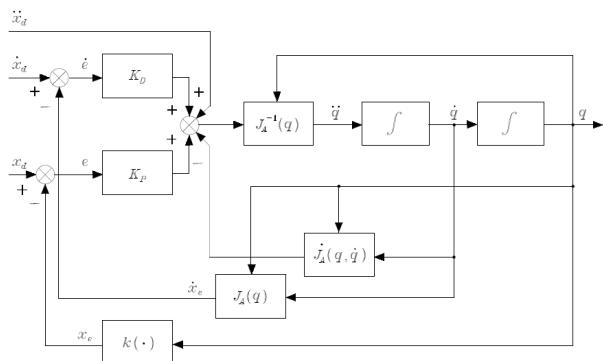


Figura 6 Schema a blocchi dell'algoritmo per l'inversione cinematica del secondo ordine con l'inversa dello Jacobiano



13 Algoritmi clik 3

Nelle problematiche in cui le variabili di giunto calcolate corrisponde una postura dell'organo terminale sono diverse da quelle desiderate nello spazio operativo si utilizzano algoritmi CLIK (Closed Loop Inverse Kinematics). Essi prevedono uno schema di soluzione che tenga conto dell'errore nello spazio operativo tra posizione e orientamento desiderati e posizione e orientamento calcolati. Si può definire tale errore e calcolarne la derivata temporale:

Si può usare tale errore per chiudere un anello di controllo in ogni istante del task come indicato nella [Figura 4](#)

Nell'ipotesi di quadrata e non singolare, la scelta dell'**INVERSA**

porta al sistema equivalente

Se K è una matrice definita positiva, allora risulta asintoticamente stabile con errore che tende a zero in dipendenza dai valori di K (più grandi sono i valori, più velocemente è la convergenza). Siccome si tratta nel tempo discreto, vi è il limite per gli autovalori della matrice dei guadagni in dipendenza del periodo di campionamento, il massimo valore K che assicura la stabilità asintotica.

L'algoritmo può essere opportunamente impiegato per calcolare una delle soluzioni ammissibili al problema cinematico inverso, laddove non presenta soluzioni analitiche in forma chiusa.

Un senso pratico è anche quello, in fase di inizializzazione, calcolare la configurazione corrispondente ai giunti.

Nel caso di un manipolatore ridondante si considera le **PSEUDOINVERSA**

Questa tecnica può essere assimilata concettualmente al controllo semplice di un robot.

Tale tecnica di controllo cinematico fornisce prestazioni soddisfacenti solo laddove non si richiedano movimenti troppo veloci e/o con brusche accelerazioni.

Tramite la **TRASPOSTA** si definisce un algoritmo per l'inversione più semplice computazionalmente in quanto non richiede la linearizzazione del legame tra ed e che assicuri la convergenza dell'errore a zero.

Ne consegue che la dinamica dell'errore è governata da un'equazione differenziale non lineare.

Tramite metodo diretto di Lyapunov si può individuare il legame sopra citato che assicuri la stabilità asintotica del sistema di errore.

Lo schema di inversione risultante è mostrato in [Figura 5](#) che mostra la caratteristica notevole di richiedere il solo computo di funzioni cinematiche dirette .

Anche in questo caso l'algoritmo può risolvere il problema cinematico inverso o, più semplicemente, inizializzare i valori delle variabili di giunto del manipolatore.

Anche in questo caso esiste un limite superiore sulla norma di K in relazione al periodo di campionamento utilizzato.

□

14 Posso aumentare K indiscriminatamente? 3

Sia per quanto concerne l'inversa\pseudo inversa , sia per la trasposta, maggiore sarà il valore degli autovalori della matrice K, è più veloce sarà la convergenza a zero dell'errore, MA esiste un limite superiore sulla norma di K in relazione al periodo di campionamento utilizzato. Tutto ciò impatta anche sugli attuatori, grossi aumenti.

15 Dimostrazione algoritmo (trasposta) che funziona con Lyapunov 3

- Metodo di Lyapunov

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T K e$$

ove

$$V(e) > 0 \quad \forall e \neq 0 \quad V(0) = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= e^T K \dot{x}_d - e^T K \dot{x} \\ &= e^T K \dot{x}_d - e^T K J_A(q) \dot{q} \end{aligned}$$

★ la scelta

$$\dot{q} = J_A^T(q) K e$$

comporta che

$$\dot{V}(e) = e^T K \dot{x}_d - e^T K J_A(q) J_A^T(q) K e$$

★ se $\dot{x}_d = 0 \implies \dot{V} < 0$ con $V > 0$ (asintotica stabilità)

★ se $\mathcal{N}(J_A^T) \neq \emptyset \implies \dot{V} = 0$ se $K e \in \mathcal{N}(J_A^T)$
 $\dot{q} = 0$ con $e \neq 0$ (stallo?)

16 Nel caso degli schemi clik che vantaggio ho nell'usare il quaternione unitario? 3

Come per la soluzione basata sugli angoli di Eulero, la soluzione della cinematica inversa basata sul quaternione unitario impiega lo Jacobiano geometrico (in luogo a quello analitico, quindi evita l'insorgere di singolarità di rappresentazione) ma risulta computazionalmente più semplice di quello asse angolo.

□

17 Errore di orientamento (pag.138) 3

L'errore di orientamento ha un'espressione che dipende dalla particolare rappresentazione dell'orientamento dell'organo terminale, ovvero angoli di Eulero, descrizione asse e angolo, quaternione unitario.

➤ Angoli Eulero

L'errore di orientamento viene scelto in base all'espressione:
dove le rispettive derivate

Con terna di angoli desiderati e calcolati.

Per cui, se non occorrono singolarità, la soluzione con inversa dello Jacobiano non ridondante sarà:

Tali angoli sono favorevoli per strutture dotate di polso sferico e sono agevoli per assegnare l'andamento temporale di , tuttavia richiede comunque il passaggio per che rende il calcolo non agevole.

➤ Asse Angolo

In questo caso, l'errore di orientamento è dato da:

Con r asse e angolo, ricavati tramite , che descrive la rotazione per sovrapporre a .

Derivando si ottiene agevolmente:

La soluzione con inversa dello Jacobiano sarà

Tale soluzione dovrebbe offrire prestazioni migliori della soluzione con Eulero poiché impiega lo Jacobiano geometrico anziché quello analitico evitando l'insorgere di singolarità di rappresentazione.

➤ Quaternione Unitario

Per quanto concerne l'errore di orientamento del quaternione unitario:

È necessario passare dalla cinematica diretta per il calcolo di tramite la matrice di rotazione .

Anche in questo caso, utilizzando lo Jacobiano geometrico, la soluzione con l'inversa sarà:

$$\dot{\eta} = -\frac{1}{2}\epsilon^T \omega$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2}(\eta I - S(\epsilon))\omega$$

L'equazione dell'errore di orientamento, da notare, è non lineare in quanto contiene l'errore di velocità angolare, è significativo quindi considerare la relazione tra derivata temporale del quaternione e la velocità angolare, prendendo il nome di *propagazione del quaternione*.

$$V = (\eta_d - \eta)^2 + (\epsilon_d - \epsilon)^T (\epsilon_d - \epsilon)$$

$$\dot{V} = -e_O^T K_O e_O$$

Per lo studio della stabilità si usa una funzione candidata di Lyapunov ottenendo:

□

18 Con la pseudoinversa mi mantengo sempre lontano dalla singolarità? 3

No perché lo jacobiano dipende da q e anche se non vado a finire proprio nella singolarità comunque potrei andare in un punto nel suo intorno e comunque è male. (min di dot q è una cosa locale, non globale). Una buona scelta sarebbe quella di massimizzare la misura di manipolabilità.

19 Domanda sul motivo per cui si usa l'inversione cinematica con lo jacobiano 3

La struttura fortemente non lineare del legame esistente tra posa nello spazio operativo e le variabili di giunto i suggeriscono un metodo per affrontare il problema cinematico inverso.

L'equazione cinematica differenziale rappresenta una trasformazione lineare tra spazio dei giunti e spazio operativo, consentendo di stabilire un legame tra le velocità dei giunti e le velocità dell'organo terminale in modo lineare, seppur dipendente dalla configurazione. Tale proprietà ci suggerisce di utilizzare l'equazione cinematica differenziale per affrontare il problema dell'inversione cinematica mediante semplice inversione dello Jacobiano considerando queste formule:

20 Come pianifica la traiettoria per orientamento nello spazio operativo? 4

Solitamente, l'orientamento della terna utensile è specificato tramite la matrice di rotazione della terna utensile rispetto alla terna fissa, tuttavia, nella fase di generazione della traiettoria, non è conveniente fare riferimento alla matrice di rotazione, infatti (ad esempio) se si interpolano i versori, non si garantisce la condizione di ortonormalità

istante per istante degli stessi.

Per ovviare tale problematica si descrive l'orientamento tramite una terna degli angoli di Eulero specificando la dipendenza temporale. Usualmente descrive il segmento congiungente con , scegliendo una legge oraria polinomiale cubica o misto parabolico-lineare. In tal modo la velocità angolare presenta una variazione continua nel modulo. Quindi, una volta assegnati i valori in termini di e data una legge oraria, si ottiene

Un modo alternativo e di più chiara interpretazione è utilizzando Asse e Angolo.

Date due terne di coordinate nello spazio cartesiano con origini coincidenti e orientamenti diversi, è sempre possibile determinare un versore r tale che la seconda è ottenibile dalla prima tramite una rotazione intorno all'asse di tale versore.

Quindi la matrice di rotazione può essere espressa come matrice di rotazione intorno a un asse fisso nello spazio, calcolando conseguenzialmente r e .

Infine è sufficiente assegnare a una legge oraria e calcolare le componenti di.

Quindi per caratterizzare la traiettoria in orientamento all'organo terminale rispetto alla terna base, basta utilizzare:

Quindi, specificato il percorso e la traiettoria nello spazio operativo, l'applicazione delle tecniche di inversione cinematica ci consente di ricavare $q(t)$ nello spazio dei giunti

21 Perché non si pianifica l'orientamento con gli angoli di Eulero? (Si considera una matrice di rotazione mutua e da quella o prendo gli angoli di Eulero, o uso asse angolo) 4

In realtà, le terne degli angoli di Eulero risolvono il problema legato alla condizione di ortonomalità dei versori della matrice di rotazione istante per istante, però il metodo di Asse e Angolo garantisce una più chiara interpretazione nello spazio cartesiano. Inoltre l'errore di orientamento con gli angoli di Eulero richiede lo Jacobiano analitico invece di quello geometrico (con la possibilità di insorgere di singolarità di rappresentazione) e inoltre a phi punto non corrisponde la vel angolare dell'organo terminale. Meglio asse angolo.

□

22 Ascissa Curvilinea (pag.185) 4

Riconducendoci ad una rappresentazione parametrica di una curva nello spazio:

Dove è un vettore 3×1 e è una funzione continua definita nell'intervallo $[,]$, l'insieme dei valori p viene detto "curva nello spazio" e tale rappresentazione parametrica definisce la curva Γ .

Si chiama ascissa curvilinea del punto generico la lunghezza dell'arco di Γ di estremi e (se segue). Tale punto è detto origine dell'ascissa curvilinea.

Si può quindi usare l'ascissa curvilinea come parametro in una diversa rappresentazione parametrica della curva Γ .

Considerando una curva con punto corrispondente dell'ascissa curvilinea, in sono definiti tre versori caratteristici della curva:

➤ **Versore Tangente:**

giace sulla retta tangente in alla curva ed è orientato nel verso positivo.

➤ **Versore Normale:**

giace sulla retta passante per , normale a e giacente su cosiddetto piano osculatore [Figura 7](#)

➤ **Versore Binormale:**

Tale versore è in grado di rendere la terna levogira

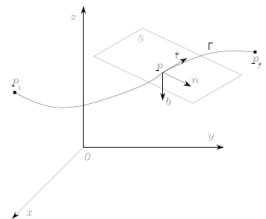


Figura 7 Rappresentazione parametrica di una curva nello spazio.

23 Organi di trasmissione 5

Gli organi di trasmissione sono necessari per conferire ai giunti del manipolatore basse velocità con elevate coppie (mentre i motori forniscono elevate velocità a basse coppie) per cui si usano riduttori che trasferiscono potenza meccanica dal motore al giunto dissipando una certa quantità di potenza tramite l'attrito .

Inoltre permettono di migliorare le prestazioni statiche e dinamiche del manipolatore, riducendo i pesi trasportati e la stazza dello stesso, ad esempio, allocando i motori alla base del robot, migliorando il rapporto potenza\peso.

I principali organi di trasmissione sono:

- **Ruote dentate** – modificano le caratteristiche del moto rotatorio variandone l'asse di rotazione e/o traslandone il punto di applicazione. Per limitare le deformazioni si realizzano con denti a sezione larga.

- **Coppie vite-madrevite** – convertono il moto di rotazione in traslazione consentendo la realizzazione di giunti prismatici. Per ridurre l'attrito si utilizzano viti a ricircolazione di sfera precaricate.
- **Cinghie dentate e catene** – servono ad allocare il motore lontano dall'asse del giunto attuato. Le cinghie sono altamente deformabili per cui vengono utilizzate quando ci sono alte velocità e basse forze, inversamente le catene richiedono basse velocità per evitare fenomeni di vibrazione.

N.B. la presenza di organi di trasmissione, benchè presentano problemi con l'elasticità e i giochi della trasmissione, consentono di trascurare la presenza di accoppiamenti non lineari nel modello dinamico. □

24 Che tipo di attuatori si possono usare per i giunti? 5

L'attuazione dei movimenti in corrispondenza di ogni giunto è realizzata da motori mediante i quali viene imposta la legge del moto desiderata.

In funzione della potenza in ingresso vengono classificati in tre gruppi:

- **Pneumatici** - usano energia di compressione mediante pistoni o turbine d'aria.
- **Idraulici** - trasformano l'energia idraulica immagazzinata in serbatoi in energia meccanica tramite pompe.
- **Elettrici** – Alimentati da energia elettrica della rete di distribuzione.

I motori per robot industriali devono possedere come caratteristiche:

- bassa inerzia ed elevato valore del rapporto potenza/peso
- elevata possibilità di sovraccarico e sviluppo di coppie impulsive
- capacità di sviluppare elevate accelerazioni
- elevato campo di variazione di velocità (da 1 a 1000)
- elevata precisione di posizionamento (almeno 1/1000 di giro)
- basso fattore di ondulazione della coppia in modo da garantire

rotazioni continue anche a bassa velocità

Siccome un robot deve seguire una traiettoria, bisogna che svolge funzione di servomotore nei giunti, per cui i motori idraulici non vengono utilizzati per il movimento per la difficoltà di controllo legata alla comprimibilità del fluido, essi infatti vengono usati unicamente per l'apertura e la chiusura di un eventuale pizza e simili.

I più diffusi sono *motori a corrente continua a magneti permanenti e a commutazione elettronica*.

Per determinate caratteristiche costruttive (sul libro pag. 199 tutte le specifiche), un motore a commutazione ha dimensioni più contenute e prestazioni dinamiche più interessanti (sono privi di spazzole e collettore che generano problemi di commutazione meccanica), a discapito del costo che tende ad aumentare.

I *motori passo*, infine, hanno una forte influenza del carico, quindi possono generare vibrazioni, per cui si utilizzano nel settore dei micromanipolatori, risultando molto convenienti a livello di costo.

25 differenza tra attuatori elettrici e pneumatici 5

Le differenze sono sostanzialmente di tipo impiantistico, presentando PRO e CONTRO in base a determinati fattori:

➤ Servomotori elettrici

- Pro
 - ✓ disponibilità diffusa di sorgente di alimentazione
 - ✓ costo contenuto e vasta gamma di prodotti
 - ✓ buon rendimento di conversione di potenza
 - ✓ facile manutenzione
 - ✓ assenza di inquinamento dell'ambiente di lavoro
- Contro
 - ✗ problemi di surriscaldamento in situazioni statiche a causa dell'effetto della gravità sul manipolatore (freni di stazionamento)
 - ✗ necessità di particolari protezioni per impiego in ambienti

infiammabili

➤ Servomotori idraulici

- Pro

- ✓ non presentano problemi di surriscaldamento in situazioni statiche
- ✓ sono autolubrificati e il fluido circolante facilita lo smaltimento del calore
- ✓ sono intrinsecamente sicuri in ambienti pericolosi
- ✓ hanno un ottimo rapporto potenza/peso

- Contro

- ✗ necessità di una centrale idraulica di alimentazione
- ✗ costo elevato, ridotta gamma di prodotti, difficoltà di miniaturizzazione
- ✗ basso rendimento nella conversione di potenza
- ✗ necessità di manutenzione periodica
- ✗ inquinamento dell'ambiente di lavoro per perdite di olio

□

26 Quale tipo di azionamento è più versatile dal punto di vista del controllo? 5

Nel confronto tra quello **elettrico** e quello **idraulico**, il secondo è meno versatile in quanto, le prestazioni dinamiche sono legate alla temperatura del fluido in pressione. Inoltre per modificare il controllo devi sostituire i pezzi dell'azionamento mentre su quello elettrico per modificare i valori di corrente o tensione agisci a livello software.

27 Riduttore meccanico (pag.209) 5

$$c_m = I_{eq}\dot{\omega}_m + F_{eq}\omega_m + \frac{c_l}{k_r}$$

$$I_{eq} = \left(I_m + \frac{I}{k_r^2} \right) \quad F_{eq} = \left(F_m + \frac{F}{k_r^2} \right)$$

Si possono osservare le formule a pagina 209, unite alla Figura 8 dalle quali si ricavano le equazioni dell'equilibrio dinamico:

Sostanzialmente, in presenza di un riduttore con rapporto di trasmissione elevato, il momento di inerzia e il coefficiente di attrito viscoso del carico sono riportati all'asse del motore notevolmente ridotti secondo un fattore ; mentre la coppia resistente è ridotta di un fattore . Se tale coppia dipende da in modo non lineare, la presenza di un rapporto di trasmissione elevato tende a linearizzare l'equazione dinamica.

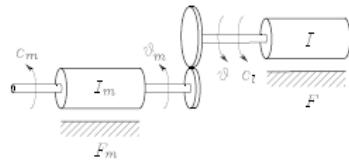
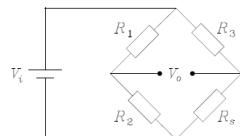


Figura 8 Riduttore Meccanico

□

28 Sensore di forza 5

La misura di una [Figura 9 Estensimetro](#) (coppia) è ricondotta alla misura delle deformazioni indotte dalla stessa, applicate ad un elemento elastico con opportune caratteristiche, detto estensimetro. Questo consente di sfruttare le variazioni di resistenza di un conduttore elettrico a seguito della variazione delle sue dimensioni.



$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_s}{R_3 + R_s} \right) V_i$$

Per trasformare le variazioni di resistenza in un segnale elettrico, l'estensimetro costituisce un ramo di un ponte di Wheatstone portato all'equilibrio in assenza di sollecitazioni.

Siccome la temperatura può incidere sulla variazione delle dimensioni dell'estensimetro, viene aggiunto un altro ramo adiacente del ponte in un secondo estensimetro.

Per aumentare la precisione, possono essere introdotti altri due estensimetri, uno per la trazione e l'altro per la compressione.

Tutto è illustrato in [Figura 9](#)

29 Sensore di coppia all'albero a che serve? 5

Tale tipo di sensore viene utilizzato per misurare (in modo diretto) la coppia trasmessa dal servomotore al giunto tramite l'ausilio di estensimetri posti su un organo deformabile tra motore e giunto, come ad esempio un albero cavo; tale organo deve possedere bassa rigidezza torsionale ed elevata rigidezza flessionale assicurando proporzionalità tra coppia applicata e deformazioni indotte.

Collegando ad un collettore ad anelli gli estensimetri montati a ponte di Wheatstone, tramite spazzole di grafite è possibile alimentare tale ponte e misurarne il segnale.

N.B. la coppia misurata è quella trasmessa dal servomotore al giunto, quindi non coincide con quella motrice indicata dagli azionamenti con , non portando in conto coppia di inerzia e di attrito del motore e delle trasmissioni.

30 Sensore di forza a croce di malta 5

Tale utilizzato come organo di connessione al posto tra l'ultimo braccio del manipolatore e l'organo terminale.

Rappresentato in [Figura 10](#) mostra 4 barrette deformabili a forma di parallelepipedo e sulle facce opposte di ogni barretta è incollato un

estensimetro che costituisce due rami del ponte di Wheatstone. Avrò pertanto 8 punti per cui posso misurare 8 deformazioni.

La matrice che lega le misure di deformazione alle componenti di forza solidale è detta “matrice di calibrazione”.

La costruzione di tale matrice è affidata ad un circuito di elaborazione di segnali.

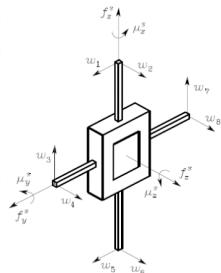


Figura 10 Sensore a croce di Malta

31 Come faccio a capire che un sensore è meglio di un altro? A partire dalle matrici di calibrazione come faccio a capire quale sensore è più accurato (pag.222)? 5

La matrice di calibrazione che presenta più zeri o comunque valori più piccoli possibile per ottenere un migliore disaccoppiamento strutturale delle componenti di forza e momenti.

□

32 Sensore di visione con formule 5

Il compito di un sensore di visione è trasformare l'intensità luminosa riflessa da un offsetto in energia elettrica. In base al principio fisico utilizzato vi sono diversi sensori, i più diffusi sono i CCD e i CMOS, basati sull'effetto fotoelettrico dei semiconduttori.

➤ **CCD:** Charge Couled Device

È costituito da una matrice rettangolare di pixel in modo tale che quando la luce colpisce la superficie, si crea un numero di elettroni

liberi tale che ognuno accumula una carica dipendente dall'integrale temporale dell'illuminazione incidente sull'elemento. Questa carica viene trasportata ad un amplificatore per poi riprodurre il segnale video.

➤ **CMOS:** Complementary Metal Oxide Semiconductor

E' costituito da una matrice rettangolare di fotodiodi precaricata, la giunzione di ogni fotodiode viene scaricata quando viene colpita da fotoni. Un amplificatore integrato per ciascun pixel trasforma questa carica in un livello di tensione o corrente.

Differentemente dai CCD, i pixel non integrano, infatti misurano la quantità e non il volume, così ogni pixel non influenza mai quello vicino impedendo l'effetto sfocatura di cui sono affetti i CCD.

➤ **TELECAMERA**

Una telecamera è un sistema complesso che comprende diversi dispositivi.

La lente ha il compito di mettere a fuoco la luce riflessa dall'oggetto sul piano dove si trova il sensore fotosensibile, detto piano immagine, come si può notare dalla

[Figura 11](#).

Considerando una terna solidale alla telecamera con l'origine al centro della lente la cui posizione rispetto alla terna base è descritta dalla matrice di trasformazione .

Considerando un punto di coordinate

(centroide dell'oggetto), la trasformazione dalla terna base alla terna telecamera è data:

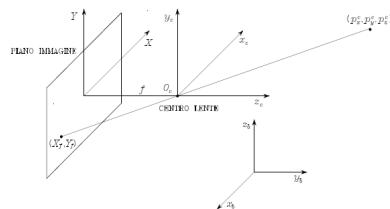


Figura 11 Trasformazione prospettica

Con p posizione dell'oggetto rispetto alla terna base.

Nella Figura 12 si introduce una terna di riferimento sul piano immagine, a causa della rifrazione, il punto della terna telecamera si trasforma in un punto sul piano immagine secondo:

Dove il “-“ è coerente con il fatto che un'immagine appare capovolta sul piano immagine della telecamera, risolvibile collocando un piano fittizio (levando il segno negativo).

Ci sono sempre imperfezioni, come le aberrazioni e le distorsioni geometriche.

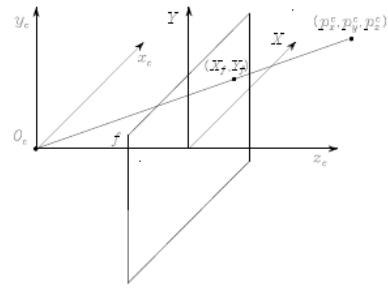
I sensori CCD e CMOS risultano dei campionatori spaziali definendo le coordinate in pixel (legate alle coordinate metriche attraverso due fattori di scala generando trasformazioni non lineari che possono essere linearizzate attraverso la rappresentazione omogena.

Si arriva ad avere la trasformazione complessiva ricavando la matrice di calibrazione

□

33 Periodo di campionamento da usare a livello servo (domandone a sorpresa?!?!)

Tipicamente 1khz o più per un controllo di forza, il controllo deve reagire velocemente in presenza interazione con l'ambiente.



34 Unità di governo (schema che trovi alla fine del capitolo); 6

35 Architettura hardware/software; 6

36 Schema controllo Robot Hw/Sw 6

□

37 Controllo decentralizzato, in tensione e corrente; 8

Tra le strategie di controllo più semplici in quanto si considera il manipolatore costituito da n sistemi indipendenti (ovvero n giunti) e controllando ogni asse di giunto come sistema a un ingresso e un'uscita, mentre gli accoppiamenti tra i giunti vengono considerati come disturbi. Il sistema formato dal manipolatore e dagli azionamenti si presenta costituito da due sottoinsiemi, uno presenta un ingresso e uscita , l'altro invece con ingressi e come uscita d .

- Il primo è lineare e disaccoppiato, ovvero ogni componente influenza solamente la corrispondente .
- Il secondo è non lineare accoppiato che porta in conto tutti i contributi che evidenziano come posizione e moto di ogni giunto si influenzano mutuamente con effetti non lineari.

Il controllore di giunto deve garantire elevate prestazioni in termini di forte reiezione ai disturbi e capacità di inseguimento di traiettorie di riferimento.

La struttura prende il nome di **“controllo indipendente ai giunti”** basata sull'errore tra uscita effettiva e desiderata e la coppia sintetizzata dall'algoritmo di controllo per l'attuatore i dipende solo dall'errore all'uscita i .

Il processo da controllare è l'azionamento del giunto i controllato in

tensione

38 Controllo in velocità non funziona per errori di modello (pag. 315) 8

Il controllo in velocità, determinato dalla relazione:

presenta il legame di proporzionalità che si ottiene tra e indipendente dai valori assunti dai parametri del manipolatore. Tale controllo, quindi, presenta caratteristiche di robustezza rispetto alle variazioni dei parametri del modello del manipolatore, enfatizzate dal valore dei rapporti di riduzione.

L'assunzione che implica che la velocità dell'i-esimo giunto dipenda solo dalla i-esima tensione di controllo in quanto la matrice è diagonale, quindi il sistema di controllo può essere inquadrato in una struttura di controllo decentralizzata

39 Che vantaggio ho nel misurare direttamente la coppia al giunto (pag. 316)? (Posso fare un controllo indipendente al giunto senza calcolare il modello dinamico) 8

Così come per il controllo in velocità, misurare direttamente la coppia al giunto fa' in modo che si può avere una struttura di controllo decentralizzata poiché facendo un controllo indipendente al giunto senza dover necessariamente calcolare il modello dinamico. I risultati, in termine di precisione, saranno più elevati quanto maggiori sono i rapporti di trasmissione e di prestazioni non esigenti in termini di velocità e accelerazioni imposte dalle traiettorie desiderate

□

40 Differenze tra controllo robusto e adattativo. 8

Nel **controllo robusto** ho incertezza dovuta alla non perfetta conoscenza del modello e alle semplificazioni intenzionali della dinamica inversa per cui si usa il metodo diretto di Lyapunov che risulta

robusto nei confronti dell'incertezza, in più ho un errore non lineare tempo variante.

Il progetto del controllore si basa sull'ipotesi che sia possibile conoscere una stima del campo di variabilità dell'incertezza η garantendo l'asintotica stabilità al variare di valori prefissati di η (che dipende da τ). In definitiva, l'approccio porta all'individuazione di una legge che ha tre contributi:

1. Termine che assicura la compensazione degli effetti non lineari e disaccoppiamento tra i giunti
2. Termine che introduce un'azione lineare in avanti che stabilizza il sistema dinamico di errore
3. Termine che rappresenta il contributo in robustezza che contrasta l'indeterminazione

Queste condizioni assicurano che tutte le traiettorie raggiungano un sottospazio attrattivo, detto di scivolamento (sliding) anche se limiti fisici degli elementi in realtà fanno oscillare intorno al sottospazio di scivolamento con ampiezze ridotte quanto più è elevata la frequenza.

L'eliminazione di queste componenti in alta frequenza (chattering) può essere ottenuta adottando una legge di controllo robusto che ne assicuri la limitatezza in norma (anche se non garantisce la convergenza a zero dell'errore di inseguimento).

Nel **controllo adattativo** il modello computazionale adottato per il calcolo della dinamica inversa corrisponde al modello dinamico del manipolatore ma sono presenti delle incertezze nei parametri.

La possibilità di ricavare leggi di controllo adattative è assicurata dalla proprietà di linearità dei parametri, per cui è possibile esprimere le equazioni non lineari in forma lineare rispetto ad un opportuno insieme di parametri dinamici costanti.

Anche in questo caso si utilizza una funzione di Lyapunov ma, a differenza del controllo robusto, la traiettoria di errore tende al sottospazio di sliding senza che sia necessario un controllo commutato ad elevata frequenza per mantenerlo. A fronte di tale risultato, il

controllo può essere reso adattativo rispetto al vettore dei parametri π .

Se i parametri non sono valutati esattamente, si può effettuare una stima che viene aggiornata nel tempo, ricavando che anche in questo caso i parametri convergono globalmente asintoticamente alla superficie di sliding, ottenendo la convergenza a zero di e la limitatezza di .

La legge di controllo si avvale di tre contributi:

1. Termine che esprime una strategia riconducibile alla dinamica inversa assicurando la compensazione degli effetti non lineari e il disaccoppiamento tra i giunti.
2. Termine che introduce un'azione lineare stabilizzante di tipo PD sull'errore di inseguimento.
3. Vettore di stima dei parametri che viene aggiornato secondo una legge adattativa di tipo gradiente che assicura asintoticamente la compensazione del modello dinamico del manipolatore.

In definitiva, tale legge non prevede azioni mirate a ridurre effetti dei disturbi esterni, per cui si osserva un degrado nelle prestazioni laddove siano presenti effetti dinamici non modellati. Il controllo robusto non soffre di tale problema, ma di contro fornisce delle naturali azioni di contrasto ai disturbi che possono risultare inaccettabili, sviluppando un andamento non eccessivamente regolare nel tempo.

41 Superfici di sliding, 8

La superficie di sliding è la superficie sulla quale le traiettorie del sistema dovranno convergere, quindi rappresenta il riferimento del sistema di controllo, dunque il comportamento del sistema in retroazione dipenderà dalla scelta di tale superficie. Si sceglie una legge di controllo in funzione della superficie di sliding; questa presenta sempre un termine discontinuo (può presentare anche termini continui) che spingerà le traiettorie del sistema in direzione della superficie di sliding, le traiettorie del sistema oscillatoranno intorno alla superficie stessa (chattering) e l'ampiezza delle oscillazioni è tanto più piccola quanto maggiore è la frequenza del segnale di controllo.

□

42 Controllo centralizzato; 8

Il controllo centralizzato si basa sulla conoscenza, totale o parziale, del modello dinamico del manipolatore in quanto, differentemente per quanto accadeva nel controllo decentralizzato dove gli accoppiamenti di giunto erano visti come disturbi da reiettare, in questo caso in presenza di manipolatori con accoppiamento diretto e/o velocità elevate, il disturbo non va ridotto ma bensì eliminato (poiché può generare errori notevoli nell'inseguimento di traiettorie desiderate), compensando i contributi non lineari. Laddove il robot presenta sensori di coppia ai motori del giunto, possono essere agevolmente utilizzati i valori per generare azione di compensazione, evitando il calcolo in linea dei termini di coppia del modello dinamico.

Quindi, il manipolatore è un sistema multi-variabile con “ n ” ingressi (coppie ai giunti) e “ n ” uscite (posizioni dei giunti) tra di loro interagenti con legami non lineari.

Il controllo che va progettato porta all'individuazione di leggi centralizzate non lineari, facendo riferimento direttamente alla generazione di coppie di controllo u .

I principali controlli centralizzati sono:

- a) Controllo PD con compensazione di gravità
- b) Controllo a dinamica inversa
- c) Controllo robusto
- d) Controllo adattativo

Differenze tra controllo robusto e adattativo. 8

1: robusto: hai incertezza sulla struttura del modello, si usa una

componente sliding per apparare la parte che non conosci. si basa in parte sulla cancellazione, in parte sullo sliding, con tutti i problemi che ne derivano da entrambe le cose adattativo: conosci il modello simbolicamente ma non ne conosci i parametri (tutti o in parte), si usa anche per stimare online i parametri.

Domanda sul motivo per cui si usa l'inversione cinematica con lo Jacobiano. 3

- 1: si usa perché $v = Jqdot$ è lineare rispetto a $qdot$
- 2: si usa perché nel caso in dovesse farla senza cinematica differenziale è un casino e quindi si fa con lo jacobiano (cine diff) e poi si integra con i vari CLIK

DOMANDE AGGIUNTIVE:

1 Dualità cineto-statica

2 Gestire la ridondanza a livello dinamico (pag. 304-305 nel paragrafo Modello dinamico nello sp. operativo)

3 Posso ottimizzare l'errore con la trasposta dello Jacobiano utilizzando una $qdot$ invece che solo uguale a " $J'Ke$ " a " $J'Ke$ fratto (Norma di Ke)" (come w nel controllo robusto) che da dei risultati buoni. Ma perché nel controllo robusto va bene e qua non posso utilizzarla? (BIG DOMANDONE PER LA LODE OMG PLS)

-Perché l'inversione cinematica è un algoritmo e come tale darebbe dei valori di q che oscillerebbero.

Quelli devono essere dei riferimenti per implementare il controllo e con dei valori di q che oscillano sarebbe impossibile. Nel caso del controllo le oscillazioni sono contenute da inerzia & co. e quindi tutto ok. (Basta che dici ALGORITMO e OSCILLEREBBERO ed è "Oussama Khatib!? Sei tu!?"

4 Differenze tra azionamenti elettrici e idraulici

-Per modificare i valori di tensione e corrente di controllo agisci via software per azionamenti elettrici, per quelli idraulici dovrresti agire sui componenti dell'azionamento a livello meccanico proprio.

5 Spiega i termini del modello dinamico. (Paragrafo Equazioni del moto pag 261)