

INFORMATICA '88

"Nuove Frontiere per la Robotica"

"Aspetti della progettazione funzionale di robots."

G. Berti, M. Giovagnoni, A. Rossi

Padova, 17 Giugno 1988.

G.Berti*,M.Giovagnoni#,A.Rossi°

* Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine - Università di Padova

Istituto di Meccanica Teorica ed Applicata - Università di Udine

° Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine - Università di Genova

Introduzione

In questo lavoro vengono illustrati alcuni degli studi condotti, da ricercatori italiani, nel settore della progettazione funzionale meccanica di robot e manipolatori.

Si è voluto precisare l'aggettivo meccanico in quanto il progetto funzionale di un sistema complesso quale è un robot richiede evidentemente il coinvolgimento e l'integrazione di differenti campi di conoscenze che spaziano dalla meccanica all'elettronica e ai sistemi di controllo. In fig.1 è riportata schematicamente l'articolazione delle fasi di progetto di un sistema robotizzato. L'obiettivo che la procedura evidenzia è quello di minimizzare gli eventuali interventi di riprogettazione e concentrarli, se del caso, nelle sole fasi in cui la loro incidenza è minima sia in relazione all'impiego di tempo per l'effettuazione delle modifiche che per il costo delle stesse [1].

La possibilità di seguire una procedura top-down integrata è condizionata fortemente dalla disponibilità di modellatori grafici e di programmi di analisi sia cinematica che dinamica che non condizionino preliminarmente le scelte progettuali e i conseguenti sviluppi, a causa di proprie intrinseche gravi limitazioni.

Nel campo dei modellatori grafici, soprattutto tridimensionali, sono attualmente disponibili sistemi:

- aperti, cioè programmabili in linguaggi evoluti;
- parametrici; (particolarmente utili, nel campo della progettazione funzionale, sono le tecniche di parametrizzazione a posteriori, {sistema ALISEO});
- dotati di data base;

potenzialmente idonei, quindi, ad essere utilizzati in un ambiente integrato di progettazione.

I programmi di analisi cinematica e dinamica, attualmente disponibili, sono stati sviluppati, prevalentemente, per l'analisi di sistemi in catena chiusa, realizzati con membri rigidi, non applicabili quindi direttamente ai robot ed ai manipolatori, in quanto meccanismi in catena aperta.

Per eseguire un'analisi di cinematismi in catena aperta, il progettista deve provvedere a chiudere la catena cinematica con elementi fittizi nel rispetto dei gradi di libertà dell'elemento terminale del robot, fig.2.

I programmi di analisi specificamente dedicati ai sistemi in catena aperta sono prevalentemente rivolti all'analisi cinematica inversa di cinematismi a struttura particolate (robot a sei gradi di libertà, con almeno tre assi delle coppie cinematiche concorrenti). Il loro utilizzo è prevalentemente indirizzato alla programmazione off line dei robot.

L'evoluzione delle strutture dei robot e soprattutto la necessità di utilizzare i robot in ambienti nonstrutturati, si pensi alle applicazioni spaziali e sottomarine, oltre alla necessità di sviluppare sistemi di progettazione sempre

più integrati, ha spinto molti ricercatori ad approfondire gli aspetti sia teorici che applicativi delle metodiche di analisi cinematica e dinamica.

In questo quadro di riferimento si inseriscono i metodi di analisi e simulazione che qui di seguito verranno presentati, rimandando per un loro approfondimento ai riferimenti bibliografici riportati.

Analisi cinematica

Fra i diversi aspetti della cinematica dei robot qui di seguito illustreremo un approccio sistematico relativo allo studio della mobilità ed alla soluzione del problema cinematico inverso [2].

Fra gli approcci che la letteratura scientifica offre per lo studio di questo ultimo problema, quelli attualmente più seguiti sono di tre tipi:

- a) approcci impliciti di tipo generale, da particularizzare caso per caso; il più noto è quello classico di Denavit Hartenberg successivamente esteso da Sheth e Uicker;
- b) approcci espliciti sistematici che esaminano tutto il complesso dei casi che possono verificarsi; il più completo è quello di Duffy, che utilizza tutte le possibili relazioni trigonometriche in una catena chiusa;
- c) approcci espliciti di tipo euristico, che esaminano singoli casi o insiemi di casi analoghi, ritenuti di particolare interesse, tipici sono quelli proposti da Manolescu.

L'approccio di Denavit Hartenberg, per quanto usatissimo, è in realtà assai poco efficiente ed è solamente usato per la sua grande generalità e semplicità di implementazione. Nel caso dell'approccio di Duffy, sebbene in teoria sia possibile affrontare tutti i casi possibili, in realtà è spesso estremamente difficile replicare i procedimenti proposti. Infine i sistemi euristici mal si prestano ad essere adattati ad un uso generalizzato.

Tutti gli approcci predetti richiedono un notevole ammontare di manipolazioni analitiche intermedie se si vuole raggiungere una accettabile efficienza od una buona comprensione del problema (valutazione delle configurazioni compatibili con i dati, informazioni sullo spazio di lavoro, possibilità di disporre di supporti per la sintesi o la scelta dei robots). Operativamente ad una impostazione astratta generale segue una fase di elaborazione analitica per recuperare una parte dell'informazione sulla struttura del meccanismo che è stata celata dalla impostazione generale.

L'approccio in esame parte dalla considerazione che per le coppie cinematiche si possono definire degli *invarianti*, entità geometriche che restano in posizione fissa durante il moto relativo tra i membri della coppia. L'invariante di una coppia inferiore è individuato da un vettore con un numero di componenti pari ai gradi di libertà che la coppia sopprime. Nella tab.1 sono riportati a titolo di esempio i movimenti delle coppie inferiori (*gruppi*) e i relativi invarianti. Nello studio dei meccanismi si incontrano anche movimenti realizzati mediante accoppiamenti superiori; anche in questo caso si possono definire degli invarianti, che coincidono con quelli del gruppo immediatamente meno vincolato del movimento considerato. Tutti i tipi di vincolo al moto sono chiamati *vincoli cinematici*.

Data una catena di membri, fig.3, si possono comporre le sue coppie cinematiche ottenendo, secondo i casi, vincoli cinematici. E' possibile determinare sistematicamente, una volta per tutte, le modalità di composizione dei vincoli cinematici ed il loro risultato. E' cioè possibile ottenere il numero delle variabili necessarie a definire il moto relativo fra i membri vincolati (*connettività*) ed il numero dei gradi di libertà che restano se si fissano i membri stessi (*mobilità passiva*).

In definitiva la metodica sviluppata ha portato a definire i vincoli cinematici (gruppi o no) come gli elementi significativi per il movimento di un meccanismo, in quanto soggetti a operazioni note di composizione e caratterizzati dall'esistenza di invarianti per i quali possono essere scritte sistematicamente le relazioni che li legano, in ogni possibile condizione.

Peculiare caratteristica del metodo sviluppato è di non utilizzare tutte le variabili delle coppie cinematiche, ma solo quelle alle quali sono sensibili gli invarianti utilizzati volta per volta. Si ottengono dunque sistemi con al massimo 4 equazioni in 4 incognite, ma spesso con un numero inferiore, al contrario di quanto avviene con procedimenti di altro tipo. In molti casi di interesse pratico si ottiene direttamente una sola equazione in una sola incognita che può essere risolta anche in via analitica.

L'approccio brevemente riassunto e riportato dagli autori Galletti e Fanghella nelle pubblicazioni citate in bibliografia [3,4,5,6,7], si rivela utile sia per la deduzione di informazioni sulla mobilità dei meccanismi per robot e manipolatori, sia per la determinazione esplicita di formulazioni ottimali (a minimo accoppiamento) delle equazioni di compatibilità; queste ultime possono essere ricavate sempre analiticamente in forma esplicita e, in molti casi, sono anche analiticamente risolubili rispetto alle variabili. Tutto il procedimento è sistematico e completamente automatico. Nella fase attuale è stato realizzato un prototipo particolare su personal computer, ottenuto con linguaggi procedurali [8].

Analisi dinamica

La necessità di utilizzare i robot a velocità sempre più elevate, in ambienti non strutturati e in applicazioni in cui il rapporto tra carico utile e peso della struttura del manipolatore diventa determinante (applicazioni spaziali) ha indotto i ricercatori ad approfondire da un lato gli studi sui materiali compositi ad elevata rigidità e basso peso e dall'altro metodi di analisi dinamica dei cinematismi realizzati con membri flessibili.

In questi ultimi anni sono stati scritti un notevole numero di articoli nel settore dei meccanismi flessibili basati sull'utilizzo del metodo degli elementi finiti [9].

La non-linearità che caratterizza i modelli matematici dei cinematismi è dovuta ai grandi spostamenti e rotazioni che si realizzano nelle coppie cinematiche. Questo tipo di non-linearità è risolubile definendo un meccanismo di riferimento costituito da membri rigidi e considerando successivamente piccoli spostamenti in campo elastico, calcolati rispetto alla configurazione nominale del sistema a membri rigidi, per ottenere la effettiva posizione del meccanismo. Diventa ovvio chiedersi come definire la posizione del meccanismo di riferimento in funzione del tempo. Se fosse possibile determinare la legge del moto del meccanismo indipendentemente dal comportamento dei membri deformabili, i procedimenti di analisi sarebbero completamente disaccoppiati: questo potrebbe essere il caso di un'analisi a regime di un meccanismo, ad esempio un biella manovella, collegato con un grosso volano la cui velocità di rotazione può essere considerata costante ed indipendente dalla dinamica del meccanismo stesso. Ma molte altre situazioni non possono essere descritte per mezzo di analisi disaccoppiate. Tipico è il caso dei meccanismi che operano continuamente in transitorio, come, ad esempio, i manipolatori. In questo caso non è possibile definire la legge del moto di un meccanismo di riferimento senza considerare contemporaneamente il comportamento elastico del sistema. La formulazione del sistema deve essere quindi dinamica e con un completo accoppiamento tra vibrazioni e moto rigido.

Anche se un approccio completamente dinamico impone un maggior onere di calcolo, in quanto devono essere risolte ulteriori equazioni di equilibrio, rispetto al caso precedente, certamente offre le necessarie informazioni per la simulazione di manipolatori flessibili, ad esempio in campo

spaziale, e potrebbe anche costituire una parte del sistema di controllo per questo tipo di manipolatori [10].

L'approccio che qui di seguito, brevemente, sarà illustrato si propone di affrontare lo studio cinetoelastodinamico in modo diretto; per gli eventuali approfondimenti si rimanda alla bibliografia allegata [11,12,13].

Il metodo in esame consente di determinare la legge del moto delle coordinate libere contemporaneamente alla legge del moto dei gradi di libertà elastici.

La complessità della formulazione cinetoelastodinamica ha suggerito di non considerare i termini secondari di accelerazione, l'effetto dei quali è risultato peraltro non particolarmente significativo nell'approccio cinetoelastodinamico.

Nel caso in questione è necessario aggiungere alle equazioni che esprimono l'equilibrio dei singoli nodi del meccanismo, un ulteriore sistema di equazioni che esprima l'equilibrio globale del meccanismo nei suoi gradi di libertà. Queste equazioni possono essere ottenute per applicazione del teorema dei lavori virtuali considerando gli spostamenti virtuali delle coordinate libere del meccanismo stesso.

Dalle simulazioni eseguite su sistemi semplici è emerso che i risultati ottenuti mediante l'approccio cinetoelastostatico sono fortemente influenzati dalle scelte delle condizioni al contorno effettuate dall'utente.

Mentre il nuovo approccio cinetoelastodinamico ha riprodotto fedelmente, in ogni caso, il comportamento vibratorio del sistema.

Sistemi di simulazione

Oltre che le attività sulle metodiche di analisi cinematica e dinamica, occorre sottolineare l'attività condotta nel campo dei sistemi di simulazione, sempre nell'ottica di offrire al progettista strumenti idonei ad uno sviluppo sistematico del progetto.

Nel seguito si farà riferimento al sistema S.A.M. ROBOT (Simulazione e Analisi Meccanica di robot industriali), sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Brescia. Le caratteristiche e la potenzialità del sistema sono ampiamente descritte nella bibliografia citata [14,15].

Il sistema consente all'utente di disporre, in un unico ambiente di lavoro, di programmi di analisi cinematica diretta ed inversa, con una particolare attenzione ai problemi di interazione utente-sistema.

Tra le caratteristiche peculiari del sistema, la cui organizzazione funzionale è riportata in fig.4, si possono elencare:

- metodi numerici per la risoluzione del problema cinematico inverso (algoritmo di Newton-Raphson modificato con l'introduzione della matrice pseudo-inversa e pseudo-inversa pesata. Opportuni pesi permettono di pilotare la soluzione esatta o approssimata rispettivamente nel caso di numero infinito di soluzioni esatte o di soluzione esatta inesistente. Si possono, ad esempio, limitare le variazioni di energia cinetica oppure tenere gli attuatori lontani dai fine corsa, etc.

- caratterizzazione del carico ai giunti e determinazione delle leggi di moto ottime da un punto di vista dinamico (riduzione delle coppie richieste ai motori, addolcimento della legge di moto, ...)

- realizzazione di programmi grafici di simulazione per analisi cinematica e dinamica dei robot.

Conclusioni

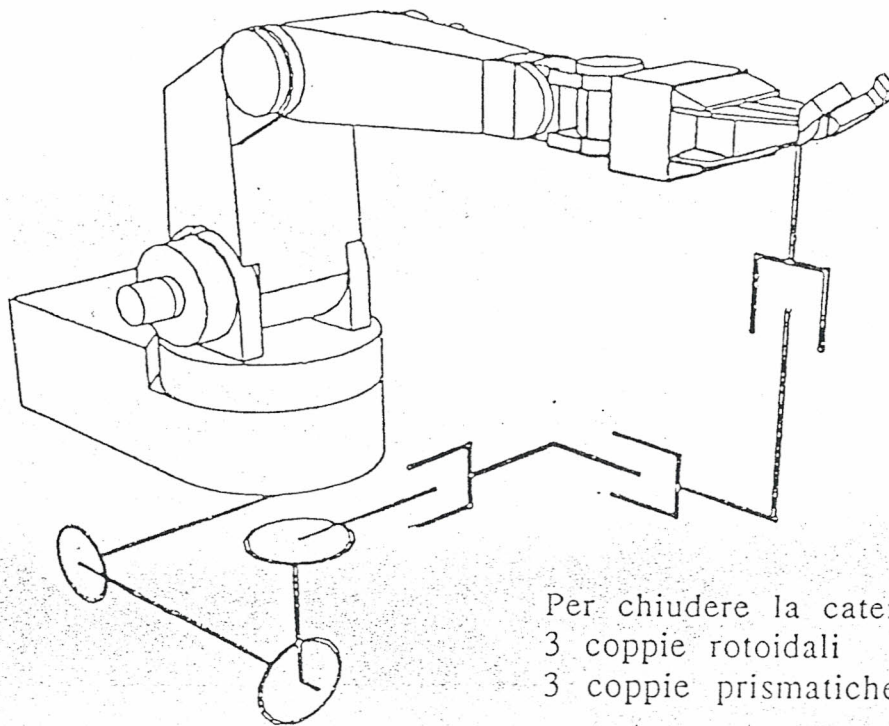
La necessità di rispondere alla richiesta di sistemi integrati di progettazione ha spinto i ricercatori, non solo ad affrontare i problemi algoritmici connessi con la soluzione di differenti tipi di analisi, ma anche ad indirizzare le metodiche di ricerca a sviluppare aspetti più ampi, rivolti alle successive fasi di un progetto, non limitandosi quindi ai soli aspetti tipicamente meccanici.

Si vede infatti che i programmi di analisi cinematica non trattano più l'oggetto di studio come una scatola nera, offrendo con dati input gli output desiderati, ma offrono la possibilità all'utente di avere in modo formale esplicito le equazioni con il minimo grado di accoppiamento.

I programmi di analisi dinamica per sistemi flessibili consentono di effettuare direttamente l'analisi del sistema deformabile. Offrendo quindi un supporto indispensabile non solo alla analisi ma anche alle successive fasi di controllo del sistema reale.

I sistemi di simulazione offrono l'opportunità di gestire in un ambiente sistematico e gerarchico le varie fasi di un progetto.

Meccanismo in
catena aperta



Per chiudere la catena:
3 coppie rotoidali
3 coppie prismatiche

Chiusura di un meccanismo in catena aperta.

Fig. 2

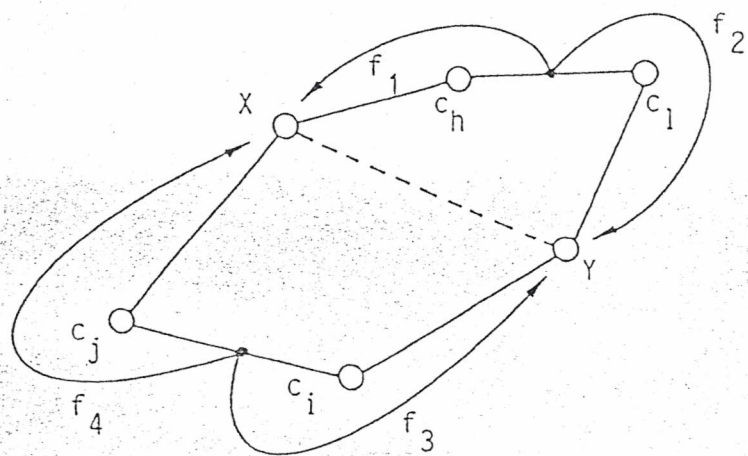


Fig 3: Vincoli su catena cinematica