

PROGETTARE MACCHINE AD ALTE PRESTAZIONI

Una procedura per affrontare tutte le problematiche inerenti la costruzione di una macchina siano esse di carattere statico o dinamico. Applicata alla scelta e al dimensionamento dell'insieme motore/trasmissione/driver per la movimentazione di un robot a elevate prestazioni a cinematica parallela, fornisce interessanti risultati

Nell'ambito della moderna progettazione di macchine automatiche si riuniscono sotto il nome di Meccatronica una serie di competenze indispensabili per la progettazione e realizzazione di macchine ad alte prestazioni. Un buon progetto non può infatti prescindere da una valutazione congiunta degli aspetti meccanici, di quelli relativi alla motorizzazione e di quelli inerenti il controllo. Queste problematiche risultano tanto più sentite quanto più le prestazioni richieste alla macchina che si sta progettando sono elevate. In particolare modo in questo articolo si presenterà la procedura di scelta e di dimensionamento dell'insieme motore/ trasmissione/driver per la movimentazione di un robot a elevate prestazioni a cinematica parallela.

Questa categoria di robot è caratterizzata dall'aver almeno una piattaforma fissa, una piattaforma mobile e una serie di arti (ing. *limb, leg, link*) che congiungono le due piattaforme. La struttura così fatta giustifica il nome che spesso viene attribuito a questi robot, ovvero robot con catene cinematiche chiuse. Queste macchine trovano impiego in tutte quelle applicazioni in cui sono richieste elevate forze accoppiate ad elevate precisioni di posizionamento. La struttura parallela ha il grosso vantaggio, rispetto alla soluzione seriale, di consentire la distribuzione del carico su più catene cinematiche, permettendo di rendere gli arti singolarmente meno carichi e quindi meno pesanti perché dimensionati per resistere a condizioni meno gravose. Questo aspetto, unitamente al fatto che i motori che azionano la macchina possono essere messi a terra, permette di costruire robot



1. La soluzione cinematica scelta garantisce all'end effector del robot di muoversi nello spazio, mantenendosi parallelo al piano di riferimento.

particolarmente veloci e dal rapporto carico pagante/peso complessivo estremamente vantaggioso.

La progettazione della motorizzazione e della trasmissione di simili macchine deve nascere da una valutazione accurata delle prestazioni desiderate e dalle richieste in termini di potenza che queste prestazioni



2. Vincoli presenti su ogni link.

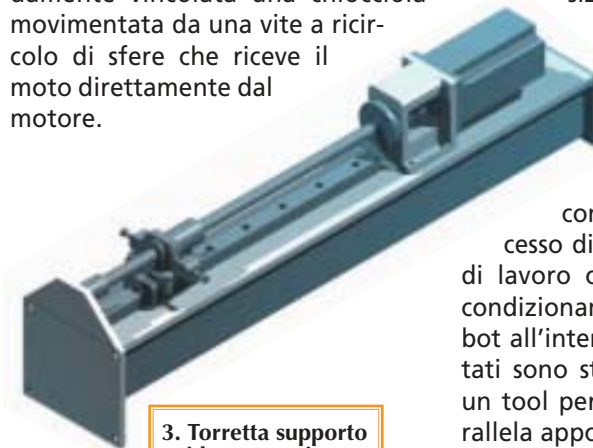
impongono. Una simile valutazione può essere fatta ricorrendo solo a complicati sistemi di calcolo che, utilizzando ad esempio l'approccio multibody, sono in grado di determinare le coppie e le forze che i motori dovranno vincere in funzione della legge di moto imposta all'end effector. Per questa ragione, in seguito alle esperienze maturate dal gruppo di lavoro nel campo della progettazione di macchine automatiche, è stato sviluppato "ad hoc" un codice di calcolo multibody in grado di fornire risposte alle problematiche sopracitate.

IL ROBOT

La cinematica parallela offre, come vantaggio rispetto a quella seriale, un alto rapporto rigidità/peso struttura: questo permette di realizzare macchine dalle elevate prestazioni congiuntamente ad elevate precisioni. La soluzione cinematica scelta per questa applicazione (figura 1) garantisce all'end effector del robot di muoversi nello spazio mantenendosi parallelo al piano di riferimento. Le applicazioni per le quali questa soluzione risulta essere adatta spaziano dal posizionamento di oggetti tipico del pick and place alle lavorazioni di precisione tipiche del-

la macchine utensili; nell'implementazione presentata in questo lavoro sono state privilegiate le prestazioni dinamiche del sistema realizzando un posizionatore estremamente rapido e pronto.

Il robot è provvisto di tre gradi di libertà e appartiene alla categoria denominata 3-P(2SS)¹, infatti ogni link è vincolato attraverso un giunto prismatico e uno sferico a una estremità, mentre all'altra è presente un solo giunto sferico come evidenziato in figura 2. Il giunto prismatico è stato realizzato attraverso l'accoppiamento di un apposito carrello a ricircolo di sfere con relativa guida; al carrello è solidamente vincolata una chiocciola movimentata da una vite a ricircolo di sfere che riceve il moto direttamente dal motore.



3. Torretta supporto guide e motori.

Il giunto utilizzato fra vite a ricircolo e motore è del tipo Oldham ed è stato appositamente realizzato al fine di ridurre il più possibile le inerzie della trasmissione. I giunti sferici del tipo teste a snodo sono reperibili commercialmente e sono stati avvitati ad appositi tappi posti alle estremità dei link tubolari. Link ed end effector sono realizzati in alluminio, il peso complessivo di questi elementi è pari a 1,4 kg. L'insieme guida/carrello, vite/chioc-

(1) Denominazione che deriva dalle tipologie di vincolo che determinano la cinematica del robot.

ciola e motorizzazione è alloggiato su una apposita torretta (figura 3) disposta perpendicolarmente al piano di lavoro.

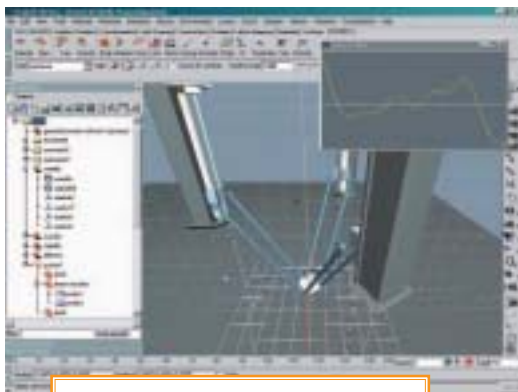
IL PROGETTO

Il robot in studio è di tipo parallelo a tre gradi di libertà in grado di compiere quindi nell'area di lavoro movimenti cartesiani. Le specifiche di progetto prefissate riguardano il comportamento dinamico della macchina che deve essere rapida nei movimenti e nel contempo precisa nel raggiungimento dei punti di posizionamento. Per il conseguimento di tali obiettivi il progetto deve muovere i suoi primi passi con la definizione della struttura cinematica. Decisa la soluzione a catene cinematiche chiuse e la tipologia di vincoli da imporre alle estremità dei link, bisogna determinare, in funzione dell'area di lavoro imposta, le dimensioni dei link stessi e le posizioni dei relativi punti di

ancoraggio in modo da identificare le dimensioni sia dell'end effector che della piattaforma fissa.

Questa valutazione si compie attraverso un processo di ottimizzazione fra area di lavoro che si vuole ottenere e condizionamento cinematico del robot all'interno di quest'area: i risultati sono stati ottenuti utilizzando un tool per robot a cinematica parallela appositamente sviluppato ed integrato nel software multibody Chrono [5] (in figura 4 è riportata l'interfaccia di tale software). Attraverso questo tool è possibile identificare l'area di lavoro e valutare per ogni suo punto la qualità del posizionamento analizzando lo jacobiano della matrice che permette la trasformazione delle coordinate dallo spazio dei giunti a quello dell'end effector.

Tale studio permette di scegliere la configurazione dei link in modo che durante il movimento del robot ci si trovi ragionevolmente lontani da punti di singolarità, garantendo nell'area di lavoro sempre dei buoni rapporti di trasmissione grazie alla valutazione dello Jacobiano. Nella figura 5 si riporta il dimensionamen-



4. Interfaccia programma Chrono.

to ottenuto per il robot, dove C, pari a 400 mm, è la corsa ammissibile del corsoio mentre L, pari a 650 mm, è la lunghezza di ogni link e A, pari a 390 mm, è il raggio del cerchio entro cui si trova inscritto il triangolo alle cui estremità sono poste le tre torrette. Con la geometria identificata, l'area di lavoro utile è rappresentata da un cilindro il cui cerchio di base ha diametro 400 mm ed altezza 200 mm.

Definita la cinematica e le dimensioni della struttura, si procede mediante un affinamento iterativo. Le forze in gioco risultano, per questo tipo di applicazione, sostanzialmente di carattere inerziale ed è indispensabile

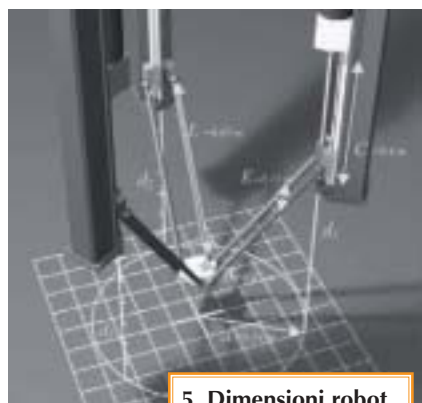
operare una riduzione delle masse in movimento compatibilmente con la resistenza richiesta alla struttura. Per questa ragione inizialmente i vari organi in movimento vengono dimensionati meccanicamente in prima approssimazione; a fronte delle masse in gioco derivanti si scelgono le rispettive motorizzazioni e i rapporti di trasmissione in grado di far compiere al sistema i movimenti previsti come obiettivo.

Successivamente si procede ad una riduzione delle masse in gioco e ad una conseguente rivalutazione della dinamica del sistema.

Definita la dinamica del sistema è possibile valutare lo stato di sforzo a

cui sono sottoposti i vari organi e passare a un dimensionamento più raffinato degli stessi, così facendo varieranno le caratteristiche inerziali del sistema e si dovranno aggiornare le scelte dei motori e delle trasmissioni. Si deve trovare il giusto compromesso fra rigidità della parte mobile e prestazioni richieste, limitate dalla massa delle parti in movimento.

Nella figura 6 è riportata un'immagine delle analisi agli elementi fi-



5. Dimensioni robot.

niti per la valutazione dello stato di sforzo e delle frequenze proprie del gruppo pinza.



6. Esempio di risultato ottenuto dall'analisi a elementi finiti.

La scelta delle motorizzazioni e dei rapporti di trasmissione è stata eseguita imponendo delle leggi di moto all'end effector e valutando le rispettive richieste a livello di ogni singolo motore.

Nell'ipotesi di considerare il moto completamente inerziale e di trascurare in prima approssimazione i rendimenti delle trasmissioni, il bilancio di potenze del sistema è rappresentato dall'equazione:

$$C_m = (J_m/\tau + \tau J_r)\omega_r$$

dove con C_m si è indicata la coppia motrice, con J_m e J_r rispettivamente i momenti d'inerzia del motore e del

carico, e con τ il rapporto di trasmissione complessivo che ha come effetto oltre quello di adeguare la velocità del motore a quella richiesta al carico anche di ridistribuire il carico inerziale fra motore e carico.

Sotto alcune ipotesi è possibile definire il rapporto di trasmissione ottimo ovvero in grado di rendere massima l'accelerazione del carico a pari coppia motrice, o in grado di rendere minima la coppia motrice a pari accelerazione del carico.

Semplificando il problema la sua espressione sarà:

$$\tau_{opt} = \sqrt{J_m/J_r}$$

In corrispondenza di tale valore di τ l'inerzia del motore ridotta all'albero dell'utilizzatore eguaglia quella del carico, questa situazione viene definita come "bilanciamento del carico" e permette di massimizzare le prestazioni dinamiche del sistema. Con questo rapporto di trasmissione il bilancio di potenze può essere scritto nella seguente forma, che ha il pregio di far comparire i termini relativi al motore separati da quelli relativi al carico:

$$\frac{C_m}{\sqrt{J_m}} = 2J_r \frac{d\omega_r}{dt}$$

Utilizzando come rapporto di trasmissione quello ottimo è anche possibile riscrivere il legame fra velocità di rotazione del motore e velocità dell'utilizzatore nel seguente modo:

$$\sqrt{J_m}\omega_m = \sqrt{J_r}\omega_r$$

Appare evidente quindi come le grandezze

$$F_m = C_m/\sqrt{J_m}$$

chiamata fattore accelerante del motore e

$$E_m = \sqrt{J_m}\omega_m$$

definita fattore cinetico del motore siano in grado di caratterizzare ade-

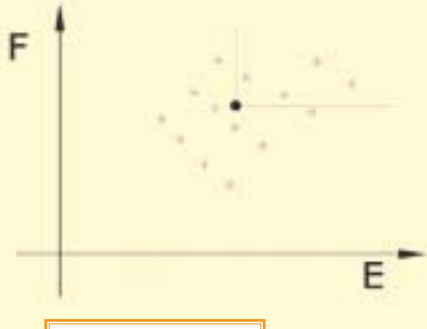
guatamente le prestazioni del motore nel problema dinamico in studio. Parimenti le grandezze $F_r = Jr\omega_r$, definita fattore accelerante del carico e

$$E_r = \sqrt{J_r}\omega_r$$

chiamata fattore cinetico del carico rappresentano nello stesso problema le richieste del carico. A fronte di queste considerazioni l'accoppiamento motore-carico deve garantire il rispetto delle seguenti disequazioni affinché il motore sia in grado di erogare potenza a sufficienza per soddisfare le richieste del carico:

$$F_m > 2F_r, E_m > E_r$$

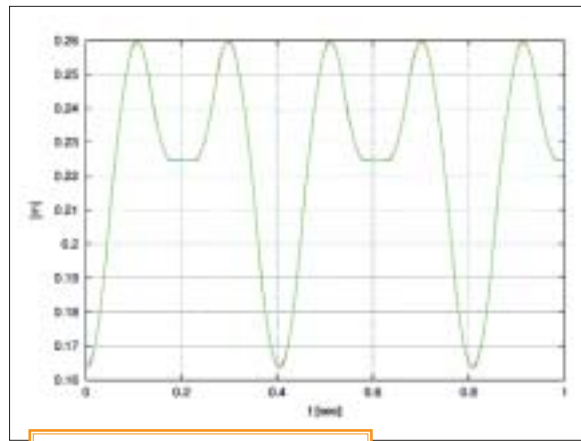
dove sono state utilizzate rispettivamente come ω_m il valore di velocità di rotazione massimo a cui è richiesto il motore funzioni mentre per



7. Diagramma FE.

$d(\omega_r)/dt$, prima il valore massimo determinabile dalle leggi di moto imposte ai vari motori in modo da verificare le condizioni di picco, e poi il valore quadratico medio per verificare le condizioni di funzionamento continuativo.

Seguendo questa procedura risulta estremamente agevole verificare l'adeguatezza delle motorizzazioni in un problema dinamico, infatti è possibile rappresentare su un diagramma E-F (figura 7) attraverso un punto ogni motore a catalogo di un costruttore e sullo stesso diagramma il punto rappresentativo il sistema da movimentare: i motori che si trovano nel semipiano destro superiore rispetto al punto rappresentativo il sistema sono tutti adatti a soddisfare le richieste del carico, ovviamente



8. Andamento della posizione.

più ci si mantiene vicini al suddetto punto più la taglia del motore risulta piccola e quindi il suo costo minore. Attraverso questa procedura è stato possibile scegliere le motorizzazioni per il robot in studio ed in particolare modo sono stati adottati dei motori brushless con coppia nominale di funzionamento continuativo pari a 2,5 Nm, coppia di picco di 5 Nm, velocità di rotazione massima pari a 4.500 giri/min mentre, per quanto riguarda la trasmissione, il passo della vite a ricircolo è di 32 mm e il suo diametro di 16 mm.

IL SISTEMA DI CONTROLLO

I motori brushless utilizzati sono pilotati da appositi drivers che si occupano di controllare il motore in velocità. Per controllare la posizione assunta dell'end effector si è implementato un controllore su un Personal Computer funzionante con un sistema operativo in hard Real Time: RTLinux. Il segnale di posizione utilizzato per la retroazione proviene dagli encoders presenti sui motori e viene letto attraverso una scheda di acquisizione dati general purpose. Dalla stessa scheda è possibile poi fornire il segnale di comando da dare ai drivers dei motori. L'algoritmo di controllo riceve come setpoint la traiettoria che l'end effector del ro-

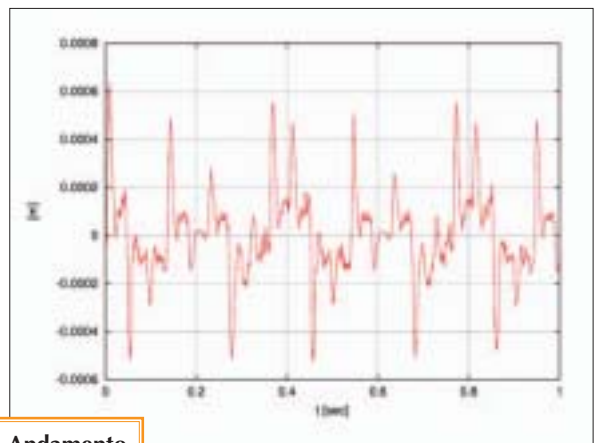
bot deve compiere espressa nello spazio di lavoro dell'end-effector, la proietta nello spazio dei giunti, ed elabora il comando da fornire ai tre motori secondo il tradizionale schema di controllo lineare denominato P.I.D. arricchito di una componente di feed-forward sulla velocità per rendere più pronto il motore a seguire ra-

pide variazioni di posizione.

Il programma di controllo si compone di due parti, la prima, scritta in C++, si occupa di realizzare il reale controllo del sistema mentre l'altra, scritta in Java, permette il dialogo fra utente e modulo di controllo. Questa scelta è stata motivata dalla necessità di rendere remotabile il controllo del robot: l'interfaccia può infatti essere richiamata da un computer remoto collegato in rete e permette di comandare il robot come se fosse presente l'operatore.

TEST SPERIMENTALI

Le prove eseguite sono servite a verificare le vere prestazioni ottenibili dalla macchina in modo da poter valutare la bontà della procedura utilizzata per la progettazione. In termini di prestazioni, l'obiettivo



9. Andamento dell'errore.

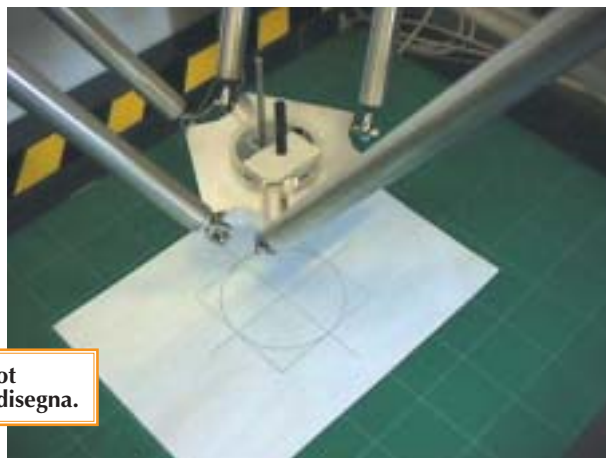
proposto durante il dimensionamento delle motorizzazioni e delle trasmissioni era quello di realizzare traiettorie di pick and place con spostamenti orizzontali di 200 mm e verticali di 50 mm alla frequenza di 5 Hz ovvero cinque spostamenti al

secondo. Questi risultati sono stati ottenuti contenendo l'errore di inseguimento e l'errore statico sotto la soglia di 0,5 mm. In figura 8 è riportato l'andamento della posizione e del setpoint di posizione nello spazio di un giunto per la legge di movimento di cui sopra, mentre in figura 9 è rappresentato l'andamento dell'errore.

Per leggi di moto più lente le precisioni di inseguimento si alzano mantenendo l'errore sotto la soglia di 0,1 mm per tutti i punti dell'area di lavoro. Il dimensionamento adottato prevede la possibilità di raggiungere accelerazioni massime pari a 80 m/s^2 .

Ulteriori prove sono state fatte dotando l'end effector di un pennino e realizzando attraverso questo dei disegni. In figura 10 è riportata una fotografia del robot mentre sta eseguendo la suddetta prova. Ogni curva è stata percorsa almeno tre volte per evidenziare la ripetibilità di posizionamento: le precisioni sono elevatissime (ripeti-

bilità inferiore a 0,010 mm), sinonimo di una elevata rigidezza della struttura e di un accurato dimensionamento delle motorizzazioni.



10. Robot mentre disegna.

CONCLUSIONI

Lo schema di progetto mecatronico presentato ha fornito interessanti risultati sia in termini di prestazioni ottenibili dalla macchina realizzata che in termini di rispetto degli obiettivi funzionali prefissati in fase

di stesura delle specifiche del robot stesso. La procedura proposta permette, in fase di progetto, di affrontare tutte le problematiche inerenti

la costruzione di una macchina, siano esse di carattere statico, come ad esempio lo sono la definizione delle aree di lavoro in funzione del condizionamento cinematico od il dimensionamento meccanico dei vari organi della macchina, siano esse di carattere dinamico quali, ad esempio, il raggiungimento di determi-

nate performance oppure la valutazione delle prestazioni massime ottenibili a fronte di ben definite precisioni.

Lo strumento di calcolo permette inoltre il raggiungimento di un altro importante risultato ovvero la valutazione delle prestazioni di una macchina in condizioni di funzionamento che non siano quelle per le quali è stata progettata, rendendo così facile l'analisi funzionale del sistema meccanico in esame.

L'applicazione di questo schema di progetto permette una rapida definizione delle performance della macchina ancora prima che questa sia realmente costruita, garantendo in tal modo il completo controllo di tutti i suoi aspetti funzionali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.Clavel, M.Bouri, S.Grousset, M.Thurneysen, *A new 4 D.O.F. parallel robot: the Manta*, The International Workshop on Parallel Kinematics Machines, UCIMU, Milano 1999.
- [2] R.Di Gregorio, V.Parenti-Castelli, *Mobility analysis of the 3-UPU parallel mechanism assembled for a pure translational motion*, IEEE-ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'99), Atlanta 1999.
- [3] M.H.Perng, T.C.Lee, Y.S.Tsai, *A systematic design procedure for parallel machine tools regarding mechanical efficiency, stiffness and workspace*, The International Workshop on Parallel Kinematics Machines, UCIMU, Milano 1999.
- [4] D.N.Centea, F.Audren, H.Lacheray, R.Teltz, *Optimization of the TIARA hexapod design - A machine tool based on parallel kinematic structures-*, The International Workshop on Parallel Kinematics Machines, UCIMU, Milano 1999.
- [5] A.Tasora, *An optimized lagrangian multiplier approach for interactive multibody simulation in kinematic and dynamical digital prototyping*, VII ISCSB, Milano, 2001.
- [6] www.rtlinux.org, *Official Realtime Linux web site*, 2001.
- [7] P. Righettini, R. Garziera, *Il Progetto di Azionamenti Ibridi*, Progettare N. 234 - Supp. Trasmissioni Meccaniche, pp. 17-22 - maggio 2000.
- [8] G. Cusimano, A. Niccolai, P. Righettini, *Azionamenti per Macchine Automatiche - Esercizi di Meccanica degli Azionamenti*, Politecnico di Milano - DSTM - settembre 2000.
- [9] G. Cusimano, P. Righettini, *Progettazione Funzionale della Motorizzazione di un Robot per mezzo del software ADAMS*, III Convention Trasmissione di Potenza, 10-12 giugno 1999, Modena Italy.
- [10] H. Giberti, P. Righettini, A. Tasora, *Design and experimental test of a pneumatic translational 3dof parallel manipulator*, 10th International Workshop on robotics in Alpe-Adria-Danube region RAAD-2001, May 16-18 2001, Vienna, Austria.
- [11] H. Giberti, P. Righettini, A. Tasora, *Mechatronic design of a 3-DOF parallel translational manipulator*, 11th International Workshop on robotics in Alpe-Adria-Danube region RAAD-2002, 30 June - 2 July 2002, Balatonfüred, Hungary.

P. Righettini è professore associato presso il Politecnico di Milano, è titolare dell'insegnamento Progettazione Meccanica Funzionale; gli altri autori fanno parte del suo gruppo di ricerca nel campo dell'automazione industriale e mecatronica.

A. Tasora è titolare di un assegno di ricerca nel campo della simulazione multibody.