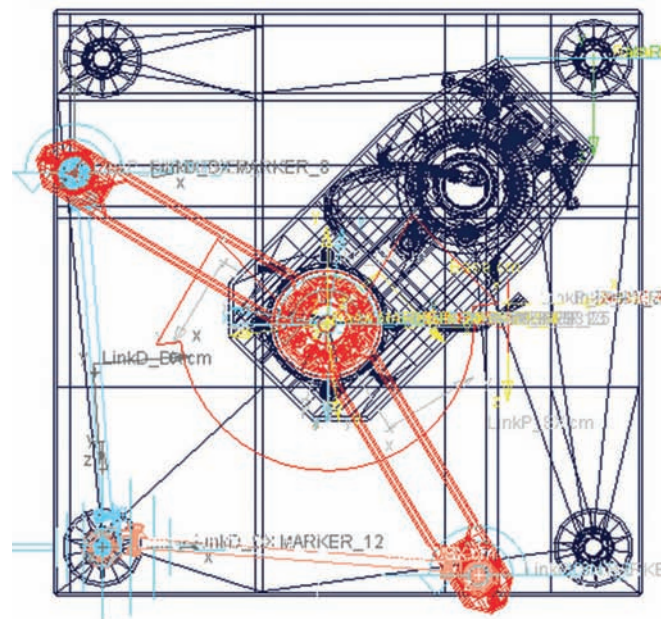
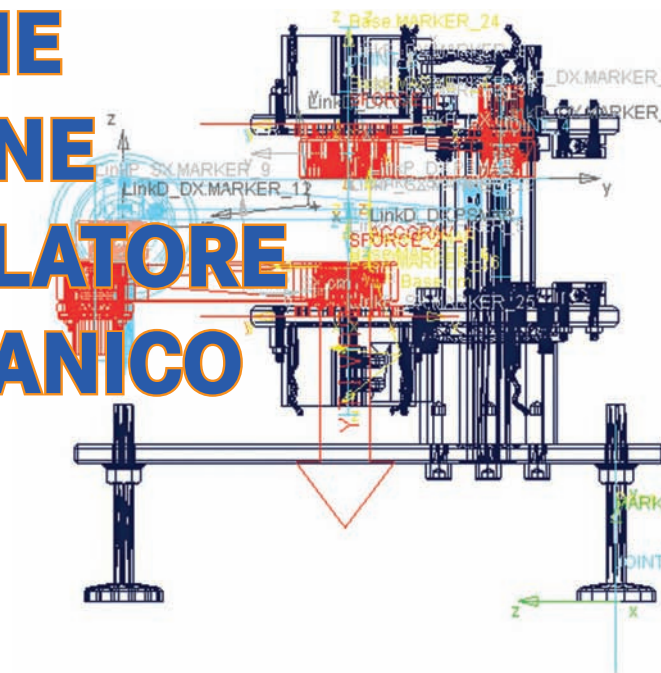


PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN MANIPOLATORE ELETTROMECCANICO

Hermes Giberti
Politecnico di Milano

La progettazione di un sistema automatico richiede una collaborazione sinergica tra le diverse aree disciplinari, coinvolgendo il know-how e le competenze in settori meccanici, elettrici e tecnici. Un robot è un sistema automatico complesso, capace di svolgere diverse operazioni rispetto a una macchina più semplice, dal momento che di solito è progettato per eseguire compiti che non sono noti durante la fase di progettazione. L'articolo approfondisce la progettazione di un manipolatore parallelo a cinque links con due gradi di libertà, evidenziando l'approccio multidisciplinare utilizzato per lo sviluppo. Partendo dalle esigenze della macchina, vengono descritti nel dettaglio il processo di ottimizzazione cinematica, la fase di progettazione strutturale, l'analisi dinamica e il dimensionamento dei sistemi di azionamento. Infine, il manipolatore progettato è stato realizzato e testato, confrontando i risultati sperimentali con quelli ottenuti dall'analisi numerica.



INTRODUZIONE

Lo scopo dell'articolo è quello di mostrare la complessità di un approccio meccatronico alla progettazione di una macchina automatica, evidenziando con l'aiuto di un esempio concreto i passi che un progettista deve seguire. L'articolo presenta la progettazione di un manipolatore cinematico parallelo a due gradi di libertà, convenzionalmente denominato PKM 5R - 2dof.

Il prototipo è caratterizzato da una struttura realizzata con quattro bracci e un telaio fisso collegati tra loro da 5 giunti rotoidali. I due mo-

LA PROGETTAZIONE STRUTTURALE DELLA MACCHINA AVVIENE SECONDO 5 FASI

1 Utilizzando come input le dimensioni degli elementi principali e i relativi vincoli, viene sviluppato un modello 3D della struttura, con particolare attenzione agli accoppiamenti tra i bracci e alla fattibilità degli elementi. Le competenze richieste sono legate all'ingegneria meccanica, strutturale e manifatturiera.

2 Una volta definita la struttura del sistema, le masse e l'inerzia delle parti mobili sono note: attraverso l'analisi dinamica del manipolatore è possibile calcolare forze e coppie coinvolte quando il robot esegue un determinato compito. Generalmente, questa operazione viene eseguita con l'uso di un software multibody: al progettista viene quindi richiesta una serie di competenze nell'ambito della modellazione di un sistema meccanico.

3 Il passo successivo è quello di dimensionare le unità per l'azionamento. Per eseguire correttamente questa operazione, è necessario sviluppare e implementare un modello elettromeccanico dei motori (e i relativi azionamenti) al fine di valutare la loro prestazione in base alle esigenze della macchina (specialmente quando questa è collegata ad una trasmissione meccanica). Il completamento di questa fase richiede competenze nel campo dell'ingegneria elettrica ed elettronica.

4 Successivamente, il manipolatore deve essere controllato per realizzare le operazioni desiderate. Gli algoritmi di controllo necessari devono considerare le dinamiche sia dei sistemi di azionamento che del manipolatore stesso, ottimizzando le prestazioni del robot per rendere il suo comportamento il più vicino possibile a quello desiderato. Poiché il controllo nel campo robotico è essenzialmente di tipo feedback, il progettista deve scegliere una serie di sensori in grado di fornire i segnali necessari al corretto funzionamento del sistema.

5 Infine, è necessario simulare il comportamento del sistema completo prima della sua realizzazione, in modo da verificarne le prestazioni, in tutta l'area (o volume) di lavoro. Nell'esempio riportato nel presente articolo l'area di lavoro doveva comprendere un rettangolo di 300x230 e la macchina doveva avere una elevata risposta dinamica così da permettere all'end effector di raggiungere i due estremi dell'area di lavoro in 0.3 secondi.

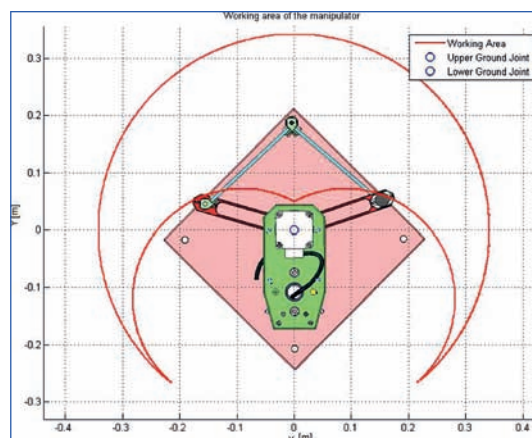


Fig. 2 - Spazio di lavoro del manipolatore

IL MODELLO PER LA SIMULAZIONE

L'analisi dinamica del manipolatore consente di valutare le forze e coppie coinvolte quando il robot esegue un determinato compito. Il modello del manipolatore è stato sviluppato grazie a una co-simulazione con MSC Adams e Matlab/SIMULINK.

I risultati delle simulazioni numeriche permettono al progettista di dimensionare correttamente le unità del motoriduttore e gli elementi più sollecitati, quali i cuscinetti, i raccordi, etc.

La figura 1 mostra il modello multibody della macchina: questo modello completamente parametrizzato risolve la dinamica inversa del sistema a partire da una determinata traiettoria e calcola coppie motorie e forze applicate alla struttura.

La struttura dell'ambiente di simulazione è suddivisa in tre parti: la prima, sviluppata in Matlab, si occupa di calcolare la cinematica inversa del robot permettendo di definire le leggi di moto che i due motori devono seguire affinché l'end effector compia la traiettoria de-

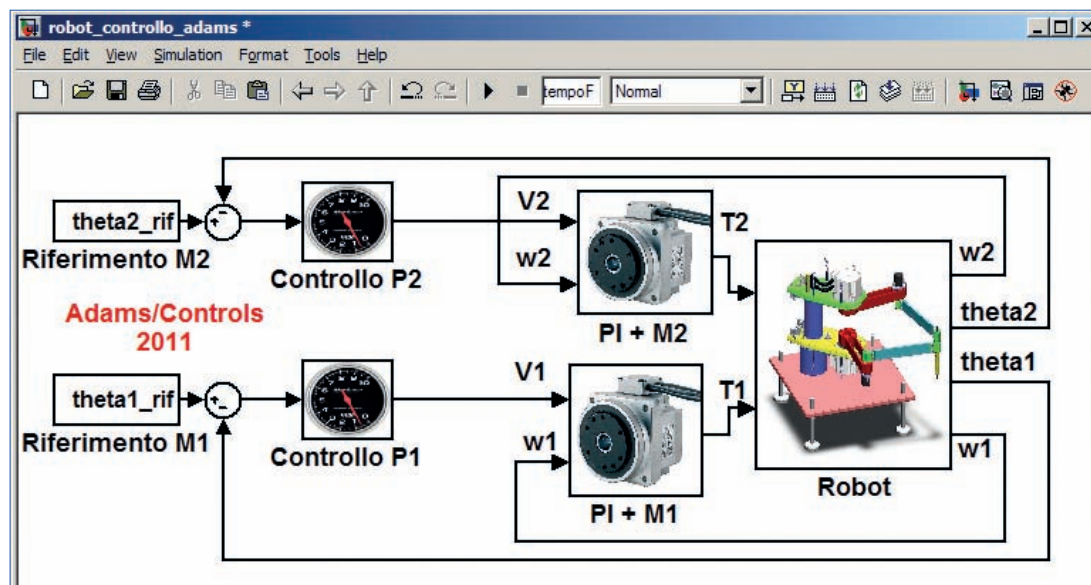


Fig. 3 - modello Matlab/SIMULINK

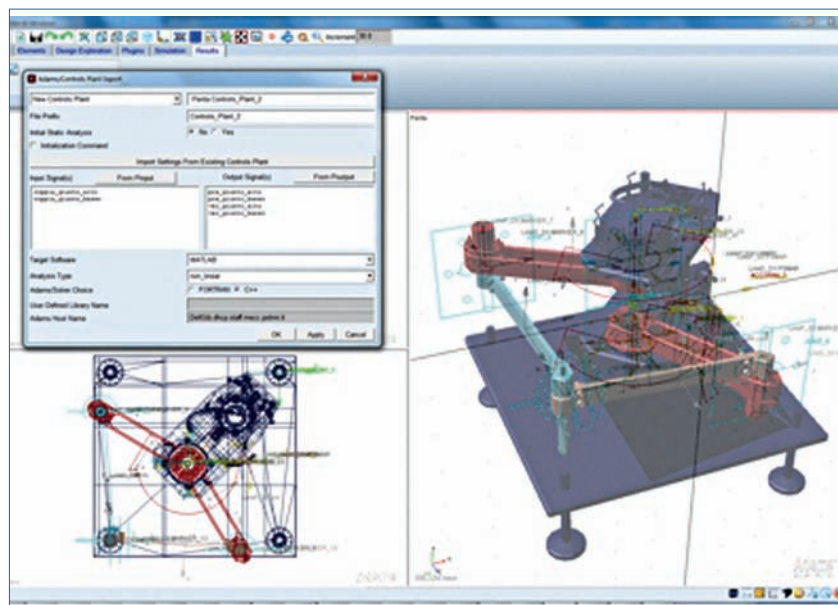


Fig. 4 - Configurazione della cosimulazione tra MSC Adams e Matlab/SIMULINK

una traiettoria nello spazio cartesiano decisa dall'utente. Il controllore, dopo aver confrontato la posizione attuale del giunto (proveniente dal modello multibody) con il riferimento, produce l'azione di controllo (tensione in ingresso ai motori). La tensione è quindi fornita in ingresso al modello del motore che genera le coppie motrici. Tali coppie vengono

considerata, mentre la seconda parte sviluppata in Simulink simula invece il sistema di controllo e la dinamica elettromeccanica dei motori generando le coppie da fornire alla terza parte, ovvero al modello dinamico del sistema sviluppato in Adams.

La figura 3 rappresenta da sinistra a destra il blocco relativo alla traiettoria di input, il blocco di controllo P/PI, il blocco delle funzioni di trasferimento del motore e il modello multibody del robot. Il processo di cosimulazione (figura 4) riproduce il comportamento reale del manipolatore.

Nel dettaglio, il sistema di controllo riceve in ingresso il riferimento proveniente dal calcolo della cinematica inversa, effettuato a partire da

passate direttamente al modello Adams che, dopo aver svolto i suoi passi di integrazione, restituisce a Matlab/SIMULINK la configurazione del sistema ottenuta in seguito all'applicazione di tali coppie. In questo modo, si genera la retroazione necessaria al funzionamento del modello.

Il controller del moto, che considera i due giunti motorizzati come indipendenti uno dall'altro, è stato progettato come un loop a doppio feedback con guadagno proporzionale per quanto riguarda posizione angolare e con guadagno proporzionale/integrale per la velocità angolare (controlli di tipo P e PI). Utilizzando uno schema di controllo indipendente per i due giunti, detto controllo decentralizzato. ▶

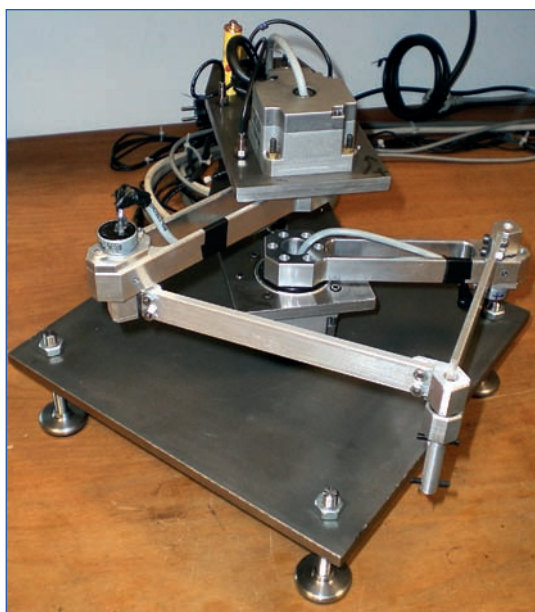


Fig. 5 (sopra) - Prototipo fisico

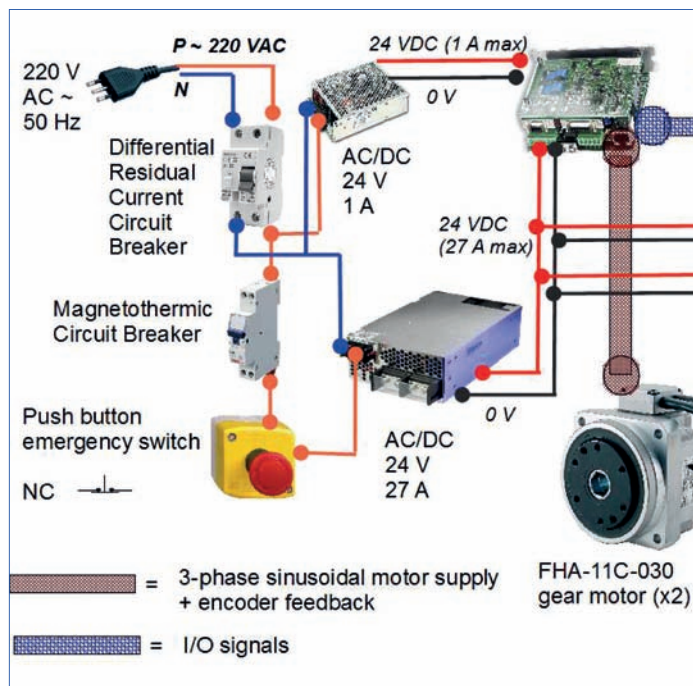
Fig. 6 - Prototipo fisico (schema costruttivo)

RISULTATI

Il manipolatore realizzato è mostrato in figura 5, mentre la figura 6 riporta uno schema sintetico dei componenti elettrici e sistemi di misurazione. L'impianto elettrico viene alimentato tramite una presa di corrente comune a 220V AC - 50 Hz; un differenziale protegge gli utenti da eventuali scariche a terra, interrompendo l'intero circuito. Il differenziale è collegato a due convertitori AC/DC, uno a potenza elevata (1000 watt) con tensione di uscita 24 V e corrente di uscita a 27 A, destinato ad alimentare il circuito principale dei servocontrollori, l'altro a potenza ridotta (25 watt), con tensione di uscita a 24 V e corrente di uscita a 1 A, destinato ad alimentare il circuito di controllo dei servoregolatori, che sono in tal modo protetti da eventuali cortocircuiti. Tra il circuito principale del servocontrollore e il convertitore AC/DC si trova l'interruttore magnetotermico (MCB), che protegge il circuito principale da sovraccarichi e sovracorrenti.

Gli azionamenti, di tipo Harmonic Drive HA680, consentono di fornire una tensione sinusoidale trifase con una frequenza di commutazione di 12,5 kHz ai motori brushless AC e la ricezione del feedback dell'encoder. Essi sono collegati a una scheda DAQ prodotta da National Instruments, utilizzata in un programma di controllo sviluppato in ambiente LabVIEW Real Time che gira su hardware di tipo Real Time PC Target.

La scheda DAQ riceve anche i segnali dei due potenziometri ed i segnali degli 8 sensori



di prossimità utilizzati per evitare collisioni. La macchina è controllata attraverso un PC che esegue in tempo reale il software di controllo sviluppato in LabVIEW. Tale PC è collegato a un altro terminale, usato dall'operatore per interagire con il dispositivo utilizzando una interfaccia grafica. Il modello elettromeccanico multibody sviluppato e il relativo schema di controllo costituisce uno strumento importante per supportare il progettista nel dimensionamento della struttura del sistema, nella scelta dei motoriduttori e nella messa a punto del sistema di controllo: occorre pertanto una validazione del modello per verificarne l'attendibilità, anche in visione di applicazioni future. La prova viene effettuata confrontando le prestazioni attese utilizzando il modello completo (modello multibody elettromeccanico con controllo) con le misure ottenute in laboratorio in relazione al prototipo fisico.

L'operazione in oggetto richiede di seguire la traiettoria mostrata in Figura 7, con una legge di moto ad accelerazione costante.

La Figura 8 mostra il confronto tra modello simulato e prototipo fisico in termini di posizione angolare dei due motori durante il movimento in oggetto: l'errore risulta essere per entrambi i motori minore di 1°, si può assumere che il modello descriva correttamente il comportamento del sistema.

Un livello più profondo di verifica è il confronto delle coppie fornite da motori. La Figura 9 mostra un confronto tra coppia simulata e coppia misurata per il motore superiore. Si noti la forte

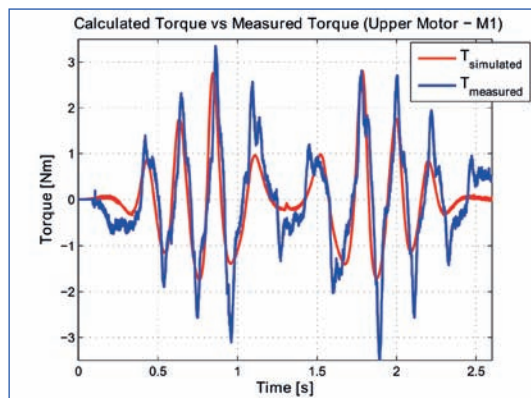
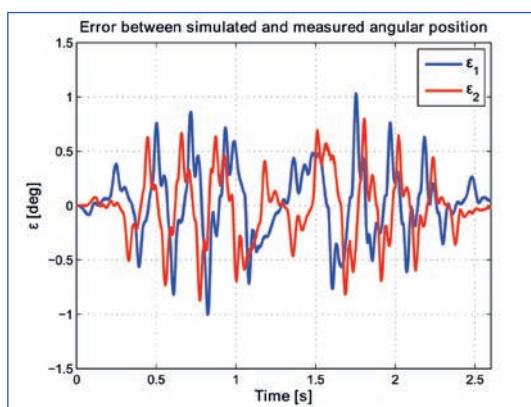
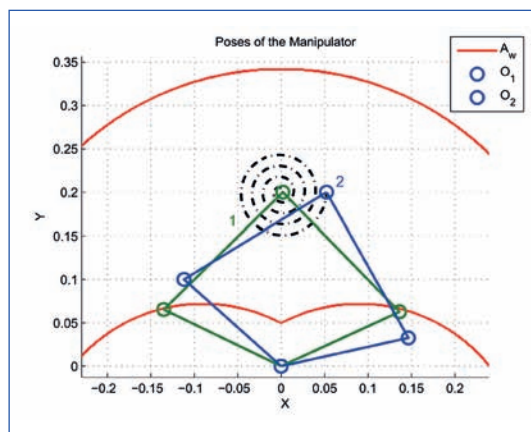
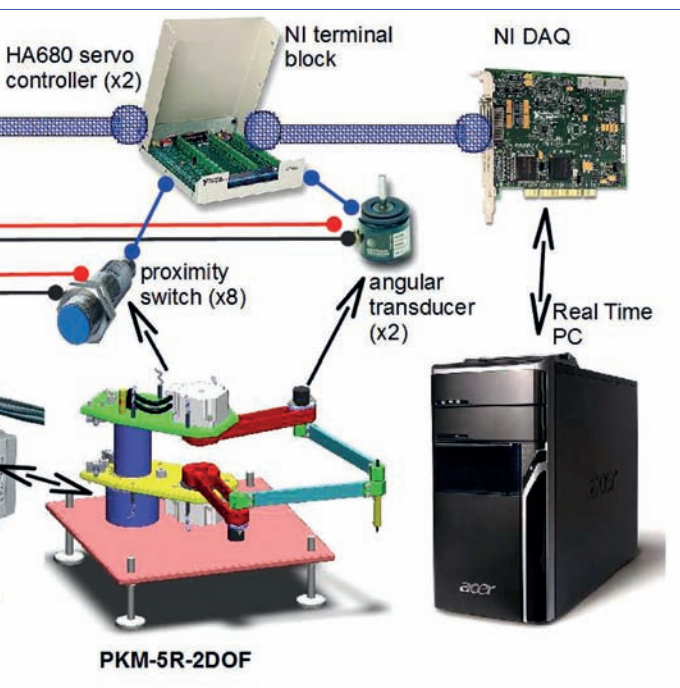


Fig. 7 - Traiettoria utilizzata per la validazione del modello

Fig. 8 - Confronto tra modello simulato e prototipo fisico

Fig. 9 - confronto tra le coppie fornite dai motori

somiglianza delle curve, a conferma di una grande affidabilità del modello. Le piccole differenze tra le coppie possono essere imputate all'attrito nei giunti, che aumentano la coppia richiesta, o alla flessibilità dei bracci distali che dà un contributo elastico al sistema.

Al contrario, al termine della traiettoria, è possibile notare che la coppia simulata diventa zero, come previsto, mentre la coppia misurata ha un valore costante di circa 0,5 Nm: infatti, quando il motore viene controllato per mantenere la posizione, il servocontrollore genera una coppia di manutenzione.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'articolo ha analizzato, attraverso un esempio concreto descritto in tutte le sue parti, l'approccio meccatronico necessario per progettare e realizzare una macchina automatica ad alte prestazioni.

In particolare, si è presentato l'ambiente di simulazione messo a punto per la verifica del progetto in tutti i suoi aspetti: lo strumento di cosimulazione offerto dalla combinazione di MSC Adams e Matlab/SIMULINK ha permesso di verificare le prestazioni del sistema in modo accurato prima che il sistema fosse sviluppato. La realizzazione del robot e la successiva verifica delle sue funzionalità hanno dimostrato la bontà dell'approccio usato e la conseguente congruenza dei risultati sperimentali con quelli simulati.

BIOGRAFIA DELL'AUTORE

Hermes Giberti è ricercatore confermato presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano dove è titolare dei corsi: "Meccanica applicata alle macchine e disegno", "Dinamica delle Macchine" e "Progettazione Meccanica Funzionale".

I suoi attuali interessi scientifici riguardano l'automazione industriale e in particolare la sintesi cinematica, il progetto e la realizzazione di sistemi automatici, attingendo a quell'insieme di competenze che vanno sotto il nome di Meccatronica. In particolare modo si è dedicato allo studio di sistemi robotici a cinematica parallela e ai sistemi di azionamento elettrico e pneumatico. È autore di circa 100 pubblicazioni scientifiche, presentate a congressi e riviste nazionali e internazionali.