

# Un manipolatore particolare



**1. La struttura parallela a 3 o 4 gradi di libertà**  
(posizione capovolta provvisoria).

Si chiama Cheope ed è riconfigurabile, ibrido parallelo-seriale, a 7 gradi di libertà. Le caratteristiche cinematiche e le prestazioni fornite lo rendono adatto a moltissimi impieghi, da quelli chirurgici a quelli industriali

Cheope è un manipolatore riconfigurabile ibrido parallelo-seriale a 7 gradi di libertà.

Riconfigurabile significa che la sua struttura cinematica può essere rapidamente variata attraverso semplici operazioni meccaniche in modo da ottenere configurazioni con diverse caratteristiche cinematiche più adatte a diversi scopi.

Ibrido parallelo-seriale significa che la parte principale della struttura a cinematica parallela muove una struttura più piccola a cinematica seriale (polso).

Il manipolatore è stato inizialmente progettato come ausilio nella chirurgia vertebrale per in-

terventi di inserzione di viti peduncolari. In tali operazioni vengono fissate delle placche di rinforzo per immobilizzare alcune vertebre adiacenti. Attualmente, i fori per le viti vengono eseguiti manualmente, quindi, la precisione di posizionamento e la programmabilità di un robot potranno migliorare in modo significativo la qualità degli interventi e ridurre i rischi di errore.

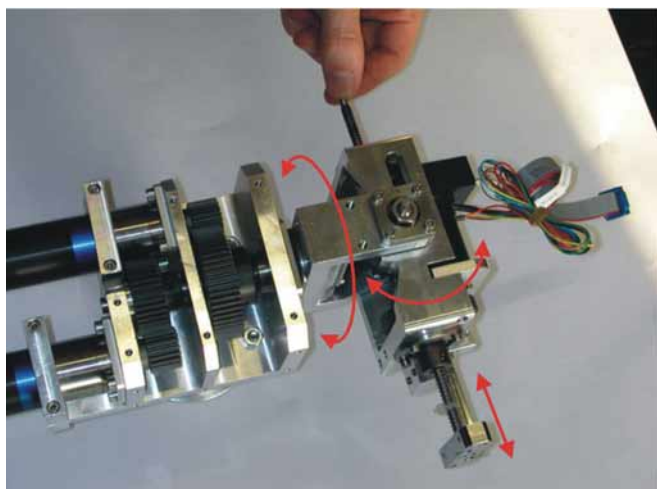
Il prototipo realizzato ha dimostrato di avere una buona versatilità, per cui il suo uso può essere esteso a diversi campi applicativi industriali quali pick-and-place rapido, lavorazioni di superfici, assemblaggio leggero, ecc.

## La cinematica

Si è scelto di utilizzare una soluzione di tipo ibrido per combinare le caratteristiche di elevata rigidità e le alte prestazioni dinamiche tipiche dei robot a cinematica parallela con la destrezza delle strutture di tipo seriale.

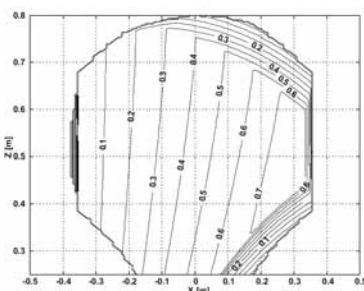
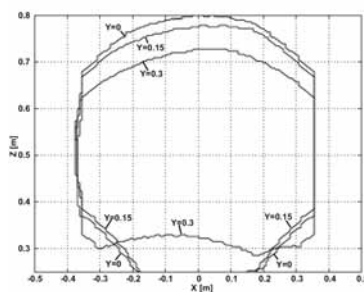
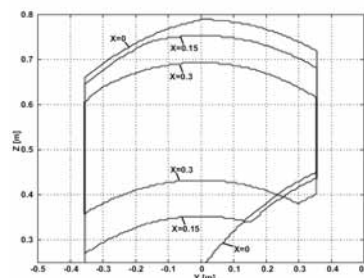
Il manipolatore Cheope è attuato da 7 motori sebbene possieda solo 5 gradi di libertà (sufficienti per fissare la posizione e l'orientamento dell'asse di un foro).

La parte principale è a cinematica parallela e può essere riconfigurata per avere 3 o 4 gradi di libertà eventualmente con un attuatore ridondante (figura 1) mentre il polso seriale ha 3 gra-



**2. Il polso seriale a 3 gradi di libertà** (2 rotazioni e una traslazione).

**4. Sezioni dello spazio di lavoro per la configurazione a 3 gradi di libertà (a) e a 4 gradi di libertà (b) con angolo di inclinazione massimo radianti (c).**



di di libertà, 2 rotazioni e una traslazione (figura 2).

Alcuni movimenti possono essere compiuti sia dalla parte parallela che dal polso seriale: questa caratteristica permette di scegliere strategie di movimento ottimali che permettano, ad esempio, di evitare di raggiungere i limiti di movimento dei giunti, di ridurre il contributo delle forze d'inerzia, di evitare di avvicinarsi a configurazioni singolari (in cui la struttura diventa labile e/o non può eseguire alcuni movimenti) o di minimizzare i tempi di movimento.

## La struttura parallela

La parte parallela comprende un telaio a forma di piramide (da cui l'idea del nome) a base quadrata con spigoli inclinati di 30 gradi rispetto all'orizzontale. Sugli spigoli sono montate quattro guide lineari i cui carrelli sono azionati da motori lineari di tipo brushless con corsa utile di 0,7 m. La piattaforma mobile di forma quadrata (lato = 0,240 m) dispone di 8 possibili punti di aggancio con i quali può essere collegata ai carrelli da bielle lunghe 0,95 m. Ogni biella ha un giunto sferico a ciascuno degli estremi. Le diverse va-

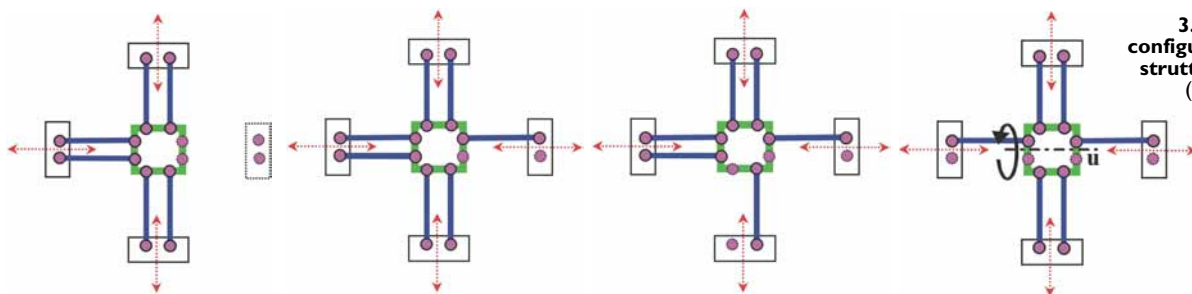
rianti cinematiche si differenziano per la disposizione delle bielle e in pochi minuti è possibile convertire una configurazione in un'altra.

Le differenti configurazioni che si possono ottenere sono rappresentate (con vista in pianta) in figura 3:

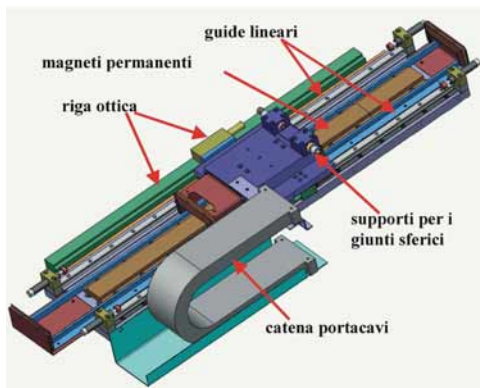
1. la piattaforma mobile è connessa a 3 carrelli (il quarto non è utilizzato) per mezzo di 3 paia di bielle tra loro parallele; muovendo i cursori degli assi lineari si ottiene un movimento 3D della piattaforma mobile di sola traslazione perché le rotazioni sono impedito dal parallelismo delle bielle (figura 3A);

2. come nella prima configurazione, tre motori controllano la posizione della piattaforma mentre il quarto è collegato a essa tramite una sola biella. Quest'ultimo motore è utilizzato come attuatore ridondante per estendere lo spazio di lavoro (aiuta a controllare il movimento vicino alle singolarità) e per migliorare la ripetibilità di posizionamento (precaricando la struttura per eliminare i giochi meccanici interni); in questa configurazione la struttura è iperstatica e il suo controllo ha richiesto lo sviluppo di particolari algoritmi di controllo di forza (figura 3B);

3. la piattaforma mobile è connessa a tutti i quattro carrelli tramite 6 bielle (quindi è isostatica); due carrelli hanno due bielle, gli altri due ne hanno una ciascuna. La piattaforma, oltre a traslare nelle 3 direzioni, può ruotare attorno a un asse; se i carrelli connessi alla coppia di bielle si trovano su spigoli opposti della piramide di base, l'orientamento dell'asse di rotazione rimane costante e orizzontale (figura 3D); se invece i carrelli connessi con la coppia di bielle sono su lati adiacenti, la piattaforma ha un asse di rotazione



**3. Le differenti configurazioni della struttura parallela** (vista in pianta).



**5. Componenti di un asse lineare.**

mobile (figura 3C); in entrambi i casi la rotazione è ridondante con una di quelle del polso e i due gradi di libertà possono essere opportunamente combinati.

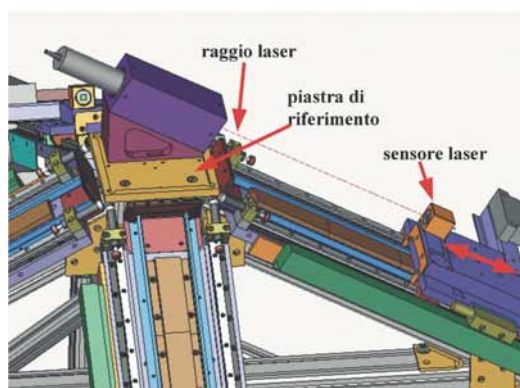
Le dimensioni geometriche della struttura (inclinazione degli assi lineari, lunghezza delle aste e dimensioni della piattaforma) sono state scelte in modo da ottenere uno spazio di lavoro il più ampio possibile. Un ulteriore vincolo che riduce lo spazio di lavoro è costituito dai limiti meccanici nella rotazione dei giunti sferici e dalla corsa degli assi lineari. Alcune sezioni dello spazio di lavoro complessivo sono riportate in figura 4. Per la configurazione a 4 gradi di libertà in ogni punto devono essere calcolati i valori massimi e minimi dell'angolo di inclinazione della piattaforma (in figura 4c, a titolo di esempio, è riportata la mappatura dell'angolo massimo per la sezione centrale dello spazio di lavoro).

## Il polso seriale

Il polso seriale (figura 2) ha una struttura classica con due giunti rotoidali ortogonali ad assi coincidenti seguiti da un asse prismatico da utilizzare per l'avanzamento dell'utensile.

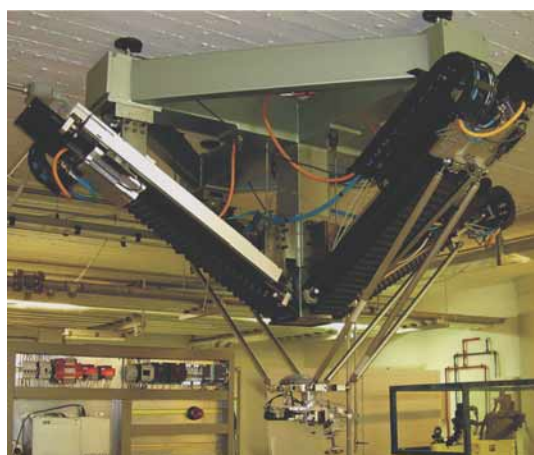
Le trasmissioni dei giunti rotoidali utilizzano ingranaggi e alberi coassiali mentre per l'avanzamento è utilizzata una vite a ricircolo di sfere. Per generare i tre movimenti si utilizzano tre piccoli motori brushless rotativi con riduttori epicicloidali.

L'avanzamento dell'asse prismatico è ridondante con il movimento della base mobile, ma la sua corsa è limitata. Esso può essere utilizzato per generare movimenti veloci e precisi mentre la struttura parallela effettua gli spostamenti più ampi.



**6. Disposizione del laser per la calibrazione di uno degli assi lineari.**

ricamente esatta) sono state elaborate due strategie. La prima consiste nella possibilità di rilevare durante il montaggio l'errore di posizionamento degli assi lineari. Ciò è possibile posizionando un raggio laser sulla sommità del telaio (usando come riferimento un'apposita piastra fissa) e un sensore laser a bordo del cursore (figura 6). Facendo scorrere il cursore lungo l'asse lineare, lo spostamento del punto di incidenza del laser sul sensore rileva gli eventuali errori di posa dell'asse. Parallelamente è stata studiata la possibilità di applicare una procedura di calibrazione all'intera struttura parallela. È stato elaborato un modello geometrico del robot in cui ogni possibile errore dimensionale è rappresentato da un parametro. Dal confronto tra le pose teoriche e quelle effettivamente raggiunte dalla base



**7. Vista complessiva del manipolatore nella sua posizione definitiva. Il manipolatore si trova appeso al soffitto e il suo spazio di lavoro è sottostante a esso.**

## Prestazioni

La parte a cinematica parallela è stata dimensionata per ottenere elevate prestazioni dinamiche. Per l'azionamento dei quattro assi lineari (figura 5) sono stati impiegati motori lineari brushless con spinta continuativa di 240 N (erogabile con raffreddamento a liquido) e spinta massima di 800 N. La posizione di ogni asse è misurata tramite una riga ottica assoluta con accuratezza di 0,005 mm. In movimentazioni punto a punto la base mobile raggiunge l'accelerazione di 5 g (50 m/s<sup>2</sup>), e una velocità di 2,5 m/s.

La presenza di giochi meccanici ridottissimi ha permesso di ottenere una buona ripetibilità di posizionamento (differenza tra le posizioni raggiunte in diverse ripetizioni dello stesso movimento). La ripetibilità mono-direzionale media (massima) è di 0,01 mm (0,02 mm) e multi-direzionale media (massima) di 0,03 mm (0,05 mm). Per ottenere un ridotto errore di accuratezza (differenza tra la posizione raggiunta e quella teo-

mobile è possibile ottenere una stima dei parametri e quindi tenerne conto per compensare l'errore di posa. Le figure da 2 a 6 si riferiscono al manipolatore nella sua posizione provvisoria di collaudo, mentre la figura 7 si riferisce alla sua posizione definitiva in cui il manipolatore è agganciato al soffitto e sovrasta lo spazio di lavoro. Il prototipo realizzato ha dimostrato di avere una buona versatilità, per cui il suo uso può essere esteso a diversi campi applicativi industriali quali pick-and-place rapido, lavorazioni di superfici, assemblaggio leggero, ecc.

Video sono disponibili su <http://robotics.ing.unibs.it>

## Ringraziamenti

*Il manipolatore è stato parzialmente realizzato in collaborazione con P. Righettini e H. Giberti del Politecnico di Milano durante il progetto COFIN/PRIN 2001 "RIME - Robot in Medical Environment" finanziato con fondi MIUR.*

*D. Tosi, G. Ziliani, N. Pedrocchi, G. Legnani, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Brescia.*