

PROGETTARE UNA MACCHINA A CINEMATICA PARALLELA

Celerius è il risultato di un'attività di ricerca finalizzata all'ideazione di un sistema di lavorazione a 6 gradi di libertà che utilizzi la tecnologia della cinematica parallela, esaltandone i punti di forza e riducendone le criticità. I punti di forza della cinematica parallela applicata alle macchine ad asportazione di truciolo, alcune criticità e limiti non completamente risolti

La forte richiesta nel settore manifatturiero di ridurre i tempi di lavorazione e di disporre di sistemi produttivi ad alta precisione operativa, efficienti, modulari e riconfigurabili è stata la spinta propulsiva che, trasversalmente, negli ultimi anni ha investito l'articolato ed esteso settore degli operatori della macchina utensile. Costruttori di macchine, di aggregati di servizio e processo, di sistemi di controllo e di regolazione, assieme con Università e Istituti di Ricerca, si sono consorziati in progetti di Ricerca Nazionali ed Europei al fine di individuare aree di interesse e tematiche tecnico-scientifiche sempre più orientate ad ampliare le conoscenze metodologiche di progettazione e di processo e di sviluppare prototipi di macchine coerenti con gli ambiziosi traguardi definiti.

Celerius, macchina utensile a cinematica parallela, è il risultato delle attività di ricerca svolte nell'ambito del Tema 1 del Programma Nazionale di Ricerca sui Sistemi di Produzione Innovativi (PNR-SPI) lanciato e finanziato dal Ministero della Ricerca (MIUR). Per la sua realizzazione hanno collaborato come partner: Consorzio di produzione 2000, ITIA-CNR, Ce.S.I e come subfornitori: Innse Berardi, Cobest, Siemens, Gamfior e Ina rullini.

La finalità centrale del progetto era focalizzata sull'ideazione di un sistema di lavorazione a 6 gradi di libertà che



Prototipo del dimostratore esposto nello stand ITIA-CNR all'ultima edizione della Bimu.

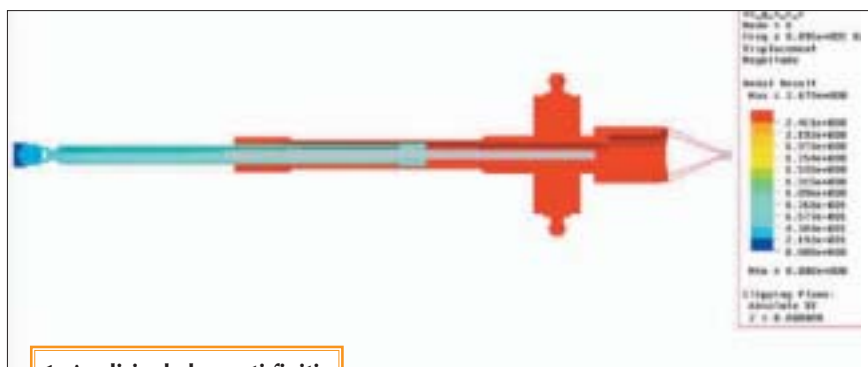
utilizzasse la tecnologia della cinematica parallela, esaltandone i punti di forza e riducendone le criticità. In sintonia con la linea guida del progetto di ricerca si è svolta una attività preliminare di compendio di tutte le P.K.M (Parallel Kinematic Machines) ad asportazione di truciolo prodotte in questi anni e un'attività di identificazione della missione operativa e delle caratteristiche tecnico-funziona-

sionale semplificato, proporzionando una struttura della piattaforma mobile e generando una geometria di appoggio, che esplicitasse il mutuo orientamento delle strutture con il mandrino posizionato al centro del volume di lavoro attraverso delle linee giacenti sui loro rispettivi assi di simmetria. Già in questa fase di ideazione dell'architettura si è valutato sia l'orientamento degli sforzi di taglio ri-

zando il software multibody AdamsTM, Mdinc adattato a un ambiente specifico per le PKM sviluppato in MatlabTM da ITIA, detto Virtual Prototyping Environment. La simulazione ha permesso di determinare il volume di lavoro, gli sforzi lungo l'asse delle gambe a regime e nei transitori di accelerazione, le variazioni di rigidità degli elementi schematizzati nel volume di lavoro e i margini di sicurezza da condizioni di singolarità.

Valutati i risultati delle simulazioni, è stata ripresa la progettazione della parte cinematica e del telaio fisso del dimostratore utilizzando il software variazionale parametrico UG di EDS Solution, configurato con ambienti integrati di modellazione, drafting, calcolo FEM (Scenario) e simulazione cinematica (Motion).

Le linee guida per la progettazione di ogni gruppo della macchina sono sta-



1. Analisi ad elementi finiti sul particolare strut.

li del prototipo. I risultati delle azioni preliminari hanno evidenziato come lo stato dell'arte della cinematica parallela non trovi, ad oggi, un'applicazione veramente interessante nel settore della meccanica di precisione e stampistico, dove le tolleranze di forma, geometriche e dimensionali dei pezzi prodotti sono molto strette e l'esecuzione di superfici sculturate in tempi brevi e con valori di rugosità bassi è fortemente richiesta. L'insieme dei dati raccolti e il forte stimolo intellettuale, scientifico e tecnico preposto alla caratterizzazione e valutazione di questa nuova tecnologia sulle impegnative lavorazioni caratteristiche dei settori sopra menzionati hanno permesso di identificare le specifiche tecniche del dimostratore.

PRESTUDIO DEL PROGETTO

La prima attività di progettazione ha riguardato l'individuazione dell'architettura del modulo, la definizione delle dimensioni dell'elettromandrino, la morfologia della piattaforma mobile, la dislocazione dei centri dei giunti universali e dei cardani, la scelta della taglia delle gambe, la cui lunghezza variabile è stata resa disponibile da Ina. In questa fase di prestudio è stato generato un modello CAD tridimen-

SCHEDA TECNICA

Struttura:	completamente parallela a 6 gradi di libertà
Applicazione:	lavorazioni a 5 assi
Prestazioni:	
Velocità massima X,Y,Z =	60 m/min; A,B = 1,4 rad/s
Accelerazione massima X,Y,Z =	10 m/s ² ; A,B = 8 rad/s ²
Mandrino	20 kW 24.000 giri/min HSK 50E
Volume di lavoro:	
Volume di lavoro a 3 assi	X = 800 mm Y = 800 mm Z = 450 mm
Volume di lavoro a 5 assi	X = 600 mm Y = 600 mm Z = 300 mm
	A,B = ± 25°
Sistema di controllo:	Siemens Sinumerik 840D
Gradi di libertà:	6

spetto alle coordinate degli assi macchina sia il contributo atteso in termini di rigidità riferita alla direzione delle forzanti di asportazione, generata dagli angoli di apertura delle terne. Ovviamente, in questa fase, si sono anche considerate le ricadute negative in termini di dimensioni generali dell'impianto prodotte da un'eventuale ridottissima variazione della rigidità statica delle terne riferita al mandrino nel volume di lavoro. L'attività preliminare è stata conclusa dal calcolo dei pesi e baricentri dei corpi mobili e dalla stima delle resistenze passive dei giunti.

SOFTWARE SPECIFICO

La prima fase di ottimizzazione cinetostatica dell'architettura individuata è stata condotta da ITIA - CNR utiliz-

te imposte dalla necessità di ottenere il giusto equilibrio tra prestazioni dinamiche, ingombro totale dell'impianto, ergonomia, semplificazione del processo di costruzione e di montaggio delle parti strutturali e rispetto del target costi. Sono stati, poi, individuati degli indicatori di controllo e verifica degli obiettivi.

LINEE GUIDA DEL PROGETTO

La progettazione si è sviluppata, nel rispetto dei limiti tecnici funzionali imposti, secondo le seguenti serie di successive attività tra loro concatenate:

- progettazione della piattaforma mobile e dei supporti dei giunti universali;
- progettazione dei giunti cardanici e

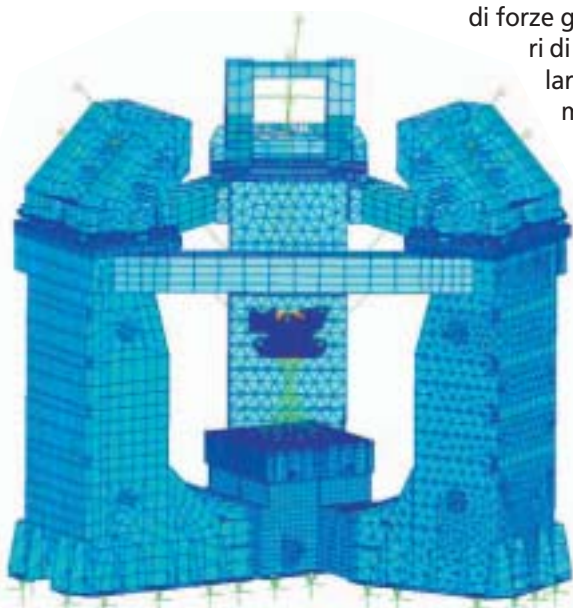
loro corretta dislocazione lungo l'asse delle strutture;

- progettazione dei supporti dei cardani e dei sistemi di regolazione;
- progettazione del frame fisso;
- analisi a elementi finiti, calcolo delle rigidità statiche di tutta la macchina riferita al mandrino, analisi modale, verifica delle collisioni e verifica degli sforzi assiali lungo gli assi di avanzamento.

Assieme all'attività di progettazione è stato messo a punto un processo sistematico per la verifica degli obiettivi legati al processo di costruzione e ai costi realizzativi, in grado di controllare il corretto conseguimento degli obiettivi prefissati in ciascuna fase del progetto.

Piattaforma mobile

Le dimensioni contenute della piattaforma mobile e del diametro dei centri dei giunti universali hanno avuto una pesante ricaduta benefica sul diametro dei centri dei giunti cardanici e quindi sulle dimensioni generali



2. Modello FEM della macchina.

dell'impianto. La minimizzazione dei pesi, invece, ha facilitato il raggiungimento di accelerazioni lineari e angolari elevate in modo da ridurre la potenza dei motori assi e ha limitato l'entità degli sforzi e dei cedimenti inerziali, permettendo una precisa esecuzione dei profili delle superfici scolturate.

Considerando l'entità delle dimensioni e del valore della potenza di un elettromandrino predisposto a eseguire lavorazioni di semigrossatura e finitura degli stampi per la plastica, la definizione della piattaforma mobile è stata messa a punto in seguito a un processo di progettazione, scelta del materiale, di analisi FEM strutturale (rigidezza, stress) e di simulazione cinematica particolarmente intenso. L'efficacia delle azioni svolte è comprovata dal peso di soli 12 kg della struttura.

Gambe e giunto universale

Un'accurata attività di coding con i tecnici INA e una minuziosa indagine a elementi finiti e simulazione cinematica fedele alla forma dell'aggregato hanno permesso un'applicazione ottimale del dispositivo e una corretta dislocazione del giunto cardanico lungo l'asse della gamba e la contemporanea verifica delle collisioni e degli sforzi lungo gli assi di avanzamento. Definito il range di forze generato nei transitori di accelerazione angolari e lineari dell'assieme piattaforma mobile più gambe, individuate le forze di taglio del duty-cycle ipotizzato sono state analizzate le inflessioni laterali delle gambe, la loro ricaduta sulla posizione dell'elettromandrino. E' stata verificata la durata dei cuscinetti e delle guide e, infine, sono stati investigati gli errori, riferiti al naso mandrino, introdotti dalla posizione del sensore di chiusura dell'anello di spazio.

Giunto cardanico

L'incertezza di posizionamento di una macchina a cinematica parallela è anche fortemente condizionata dalla precisione di costruzione e dall'isteresi dei giunti. Si è perciò progettato un giunto cardanico estremamente compatto, lavorabile su una macchina utensile di altissima precisione, montabile secondo una procedura metodologica che garantisce errori finali geometrici e di forma dei due assi di

rotazione estremamente bassi, dell'ordine di pochi micron.

L'utilizzo di cuscinetti volventi ad alta precisione ha permesso di ridurre gli attriti e di minimizzare l'ondulazione di coppia degli assi rotanti.

Supporto cardani

Particolare attenzione è stata dedicata al sistema di regolazione e fissaggio del supporto cardano al telaio mobile. Il dispositivo doveva assicurare, da un lato, un rigido collegamento ai mon-



3. Modello tridimensionale della macchina.

tanti e, dall'altro, garantire una forte contenimento degli errori di posizionamento dei centri dei cardani. Per l'assemblaggio dei tre gruppi sui montanti sono stati studiati una procedura di montaggio e un calibro, che tramite opportuni riferimenti permettesse un rapido posizionamento e fissaggio delle due terne di strutture.

La forma e le dimensioni della struttura sono state concepite per essere lavorate su macchine utensili ad altissima precisione e per essere facilmente montate in ambiente termostato. Il recupero degli errori residui è stato raggiunto attraverso l'impiego di sonde e regolazioni. La stesura di metodologie di misura e procedure di montaggio ha garantito il contenimento dell'entità degli errori finali.

Telaio fisso

L'ottenimento di elevate prestazioni dinamiche del simulatore è sensibil-

mente subordinato alla rigidità e allo smorzamento strutturale del frame fisso. L'ideazione dei montanti doveva, tuttavia, rispondere anche ad altre specifiche tecniche funzionali quali una buona accessibilità al pezzo, un'ottima evacuazione del truciolo e una buona predisposizione a configurazioni con cambio utensile e cambio pallet. A seguito di ciò è stata pensata una struttura ibrida i cui elementi costitutivi fossero congegnati in modo da garantire la funzionalità richiesta. Il mantello di ridotte dimensioni dei piloni è stato realizzato in acciaio elettrosaldato, irrigidito da un giro di nervature dedicato, dislocate in modo da esaltare la rigidità locale di alcune zone critiche e di garantire un'ottimale adesione del materiale smorzante disposto sul perimetro interno delle sezioni maestre.

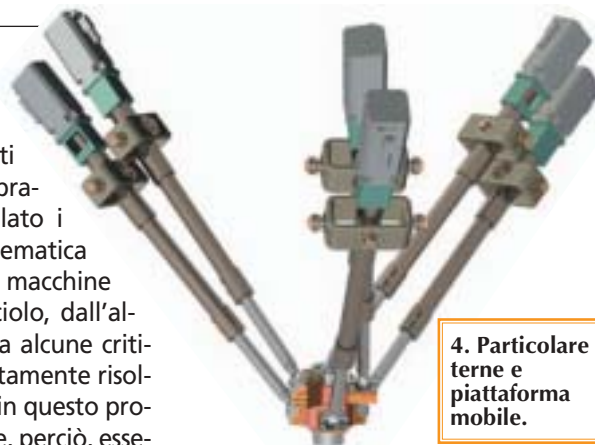
CONCLUSIONI

La macchina, esposta alla Bimu di Milano dello scorso anno, ha suscitato vivo interesse e curiosità. Il prototipo è stato, poi, sottoposto a una serie di

prove sperimentali alcune delle quali ancora in corso. I primi dati raccolti e analizzati sembrano confermare da un lato i punti di forza della cinematica parallela applicata alle macchine ad asportazione di truciolo, dall'altro mettono in evidenza alcune criticità e limiti non completamente risolti. Tutto il lavoro svolto in questo progetto di ricerca potrebbe, perciò, essere ulteriormente sviluppato proprio approfondendo e investigando ulteriormente le criticità emerse.

I vantaggi sono molteplici e possono essere sintetizzati nella brevità dei tempi di lavorazione, nella buona finitura superficiale di forme sculturate in seguito alle elevate prestazioni del simulatore in termini di accelerazione e nella sensibile riduzione della potenza dei motori assi grazie alla leggerezza delle masse movimentate.

Le criticità e i limiti, tipici di questa tecnologia, derivano dallo sfavorevole rapporto tra le dimensioni dell'impianto e il volume di lavoro dovuto al-



4. Particolare terne e piattaforma mobile.

la dipendenza non lineare tra le grandezze comandate e le posizioni ottenute, ovvero alla generazione di punti di singolarità e alla forte dipendenza delle grandezze caratteristiche della macchina, come rigidità, precisione e prestazioni dinamiche, dalla posizione del naso mandrino nel volume di lavoro.

C. Reppini, direttore di progettazione Ce.S.I. Centro Studi Industriali, Cologno Monzese (Mi).