

I VANTAGGI DELLA PROGETTAZIONE MECCATRONICA

La fusione sinergica delle conoscenze meccaniche, elettroniche e informatiche consente di giungere a nuovi concetti di macchina e a uno sviluppo del progetto armonico e unitario, dall'idea iniziale fino all'introduzione del prodotto sul mercato

Molti costruttori di macchine si rendono conto dell'importanza di una progettazione condotta secondo i criteri della meccatronica solo a macchina ormai finita, quando quest'ultima non riesce a raggiungere le prestazioni attese. Un'analisi meccatronica del sistema consente di individuare gli errori e i punti critici consentendo la loro successiva eliminazione. È tuttavia più sensato procedere ad uno studio organico fin dall'inizio dello sviluppo del progetto: in questo modo gli eventuali punti critici possono essere identificati anzitempo e possono essere eliminati con dei costi ragionevoli. Una progettazione condotta secondo un approccio meccatronico permette in tal modo di ridurre i costi e i tempi di realizzazione della macchina.

Un confronto fra il metodo classico di sviluppo di una macchina e il metodo che prevede la realizzazione di un prototipo virtuale (figura 1) ci consente di valutare meglio questi vantaggi. Con un approccio tradizionale, prima si procede alla progettazione meccanica e solo successivamente si identificano i componenti elettrici necessari all'azionamento dei vari organi di macchina. Al termine viene realizzato almeno un prototipo che viene sottoposto ad una lunga fase di test per identificare i miglioramenti e le ottimizzazioni necessarie prima di arrivare al prodotto che verrà lanciato sul mercato.

Con un approccio meccatronico, al contrario, gli aspetti meccanici ed elettrici/elettronici non vengono considerati separatamente e sequenzialmente ma congiuntamente e contemporaneamente fino alla realizzazione di un prototipo virtuale sul quale svolgere delle simulazioni al com-



1. Confronto fra metodo di progettazione tradizionale e approccio meccatronico.

puter. Solo al termine delle ottimizzazioni svolte sulla macchina virtuale si passerà alla realizzazione di un prototipo reale, che si comporterà in modo molto simile a quanto previsto. Questo processo consente di realizzare macchine migliori, con costi complessivi di sviluppo ragionevoli e riducendo il "time to market", oggi sempre più chiave di volta per decretare il successo di un nuovo prodotto.

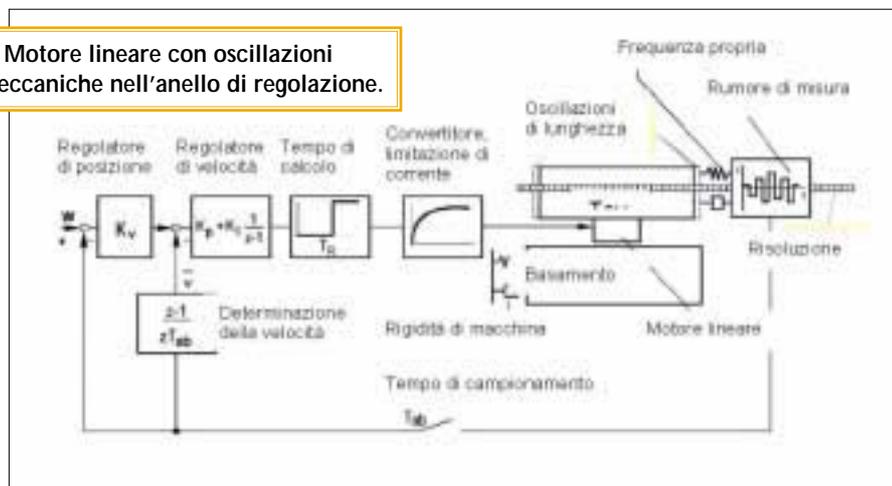
A differenza di quanto fanno altre società di consulenza nel settore della meccatronica, Siemens non si limita a compiere delle simulazioni, ma offre analisi complete, che tengono conto anche dell'influenza del sistema di aziona-

mento e di controllo, di propria fornitura. L'esperienza maturata in questo settore ci consente così non solo di aiutare i nostri clienti a realizzare macchine migliori, ma anche di adeguare

precisione dinamica al comando e una adeguata rigidità ai disturbi. Soprattutto sulle macchine utensili occorre fare i conti con una serie di forze di disturbo che agiscono sull'asse di lavorazione come ad esempio le

dei disturbi è rappresentato in figura 2: le oscillazioni di lunghezza si traducono in un disturbo che viene introdotto nell'anello di regolazione dal sistema di misura. Le deformazioni elastiche delle strutture meccaniche limitano le prestazioni dinamiche di una macchina su due fronti:

2. Motore lineare con oscillazioni meccaniche nell'anello di regolazione.



- limitazione della banda di regolazione in base al criterio di stabilità secondo Nyquist. Ciò limita la precisione e la rigidità dinamica, che comporta generalmente una riduzione della velocità di lavorazione;
- l'eccitazione di risonanze meccaniche in una struttura di macchina può essere attenuata mediante il sistema di controllo attraverso una limitazione del Jerk (velocità di variazione dell'accelerazione). Ciò conduce tuttavia ad un allungamento dei tempi di accelerazione e così nuovamente ad una riduzione della velocità di lavorazione.

continuamente i nostri prodotti alle esigenze che le più recenti tecnologie di lavorazione e produzione richiedono.

forze di attrito e le forze di lavorazione, nonché con le oscillazioni di forza derivanti dalle vibrazioni di macchina. Il solo attrito dovuto alle guide degli assi interpolanti, in presenza di una inadeguata rigidità di

Nel settore dei centri di lavoro ad alta velocità il guadagno proporzionale del regolatore di posizione può assumere valori che vanno da $K_v = 5$ a

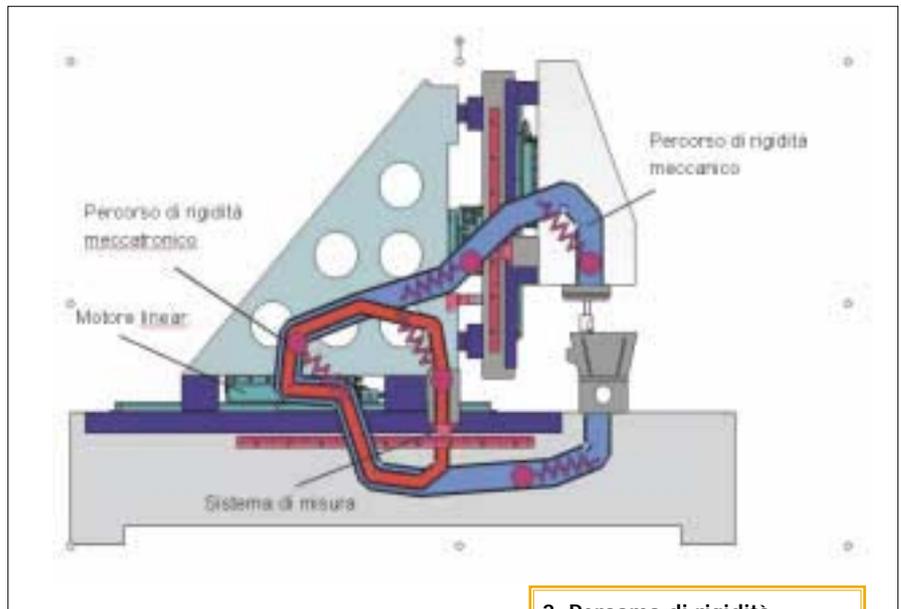
IL CONTROLLO DEGLI AZIONAMENTI DIRETTI

La precisione statica e la ripetibilità di un asse di macchina sono determinate sostanzialmente dal sistema di misura, dalla finezza di regolazione del sistema di controllo, dalla rigidità meccanica e dalla stabilità termica della macchina. La rigidità dinamica per contro, venendo in questo caso a mancare gli organi di trasmissione, è determinata dalla prontezza del sistema di controllo e dal comportamento dinamico della macchina.

Per il controllo dei servomotori Brushless e dei motori lineari viene di solito utilizzata un'architettura di regolazione a cascata del tipo riportato in figura 2. I sistemi di controllo digitali permettono poi di affinare lo schema di regolazione mediante filtri sui riferimenti e sulle retroazioni, adattamenti dinamici e precomandi di velocità e corrente. A patto di operare con tempi di campionamento sufficientemente ridotti e con una elevata dinamica dell'anello di regolazione di corrente, nonché mediante sistemi di misura ad alta risoluzione, si possono raggiungere guadagni d'anello molto elevati. Ciò costituisce una premessa fondamentale per una buona

namica, conduce ad elevati errori di inversione sulle traiettorie di tipo circolare.

La banda passante idealmente consentita dal sistema di controllo, sulle macchine reali, viene spesso ridotta per effetto delle retroazioni dovute alle risonanze meccaniche che introducono disturbi nell'anello di regolazione. Lo schema di accoppiamento



3. Percorso di rigidità mecatronico e meccanico.

$K_v = 30 \text{ m}/(\text{min}\cdot\text{mm})$ dove il valore più elevato può essere raggiunto anche su macchine con masse mobili dell'ordine della tonnellata. Anche su macchine a prima vista sostanzialmente simili tuttavia si possono riscontrare considerevoli differenze di comportamento: un'analisi di queste differen-

MODO DI VIBRARE	FREQUENZA	CONSEGUENZE	LIMITAZIONE
Macchina rispetto alle fondazioni (figura 4, esempio 1)	~... 30 Hz	Risposta dell'anello di regolazione di posizione	Limitazione del Jerk
Struttura di macchina (figura 4, esempio 2)	~10... 40 Hz	Risposta dell'anello di regolazione di posizione, stabilità ad anello chiuso	Limitazione del Jerk Limitazione del Kv
Componente dell'asse (figura 4, esempio 3)	~20... 200 Hz	Risposta dell'anello di regolazione di posizione, stabilità ad anello chiuso, stabilità dell'anello di regolazione di velocità	Limitazione del Jerk Limitazione del Kv Limitazione del Kp
Modi di ordine superiore dei componenti dell'asse (figura 4, esempio 4)	~100... 600 Hz	Stabilità dell'anello di regolazione di velocità	Limitazione del Kp (in alcuni casi la stabilizzazione si ottiene mediante un filtro su riferimento di corrente)
Vibrazioni locali, componenti del sistema di misura, risonanze interne del trasduttore	~500... 2000 Hz	Rumorosità di alta frequenza (fischi) e oscillazioni permanenti ma di ridottissima ampiezza dell'asse	Limitazione del Kp (nella maggior parte dei casi la stabilizzazione si ottiene mediante un filtro sul riferimento di corrente)

Tabella 1. Classificazione dei modi di vibrare di una macchina rilevanti ai fini del controllo.

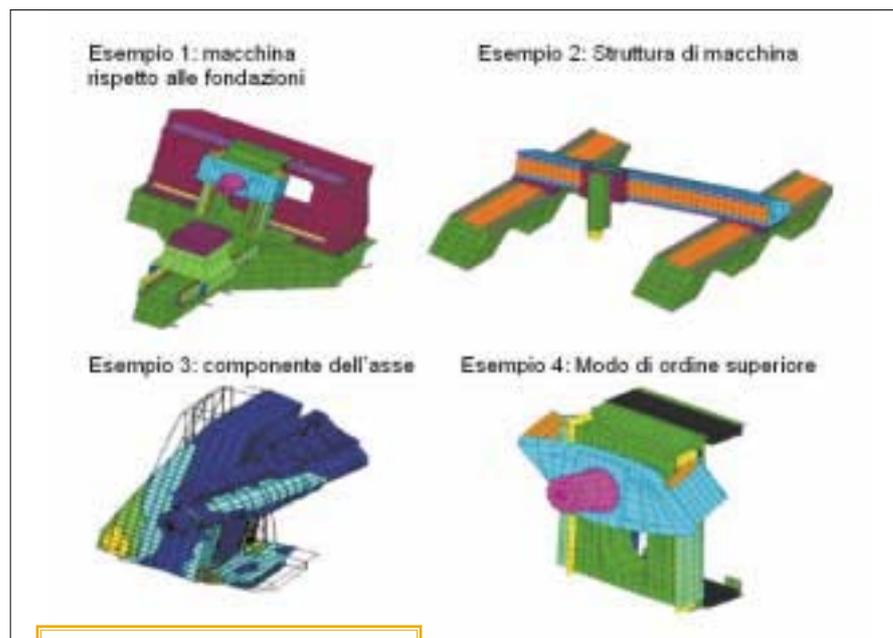
dell'anello di regolazione di posizione e/o il valore del Jerk ammissibile. A tal proposito va tuttavia osservato che una stessa oscillazione di macchina può sortire effetti assai diversi a seconda della conformazione (qualità strutturale) della macchina, e cioè:

- se un'oscillazione di una certa ampiezza non introduce né uno spostamento fra utensile e pezzo né uno spostamento fra trasduttore di misura e motore, questa non può essere adeguatamente limitata: l'unica possibilità è quella di ridurre l'ampiezza dell'oscillazione mediante una limitazione del Jerk. Un tipico esempio in questo senso è costituito da una macchina non adeguatamente vincolata alle fondazioni che, in un flusso chiuso di forza fra utensile e pezzo, oscilla durante la lavorazione;
- se un'oscillazione di una certa ampiezza produce uno spostamento fra utensile e pezzo ma non introduce uno spostamento fra trasduttore di

ze richiede una trattazione più approfondita.

Indipendentemente dalla precisione dinamica di un azionamento rispetto al proprio trasduttore di posizione (percorso di rigidità meccatronica in figura 3) che può essere controllata direttamente dal sistema di regolazione, ciò che conta è la precisione sul pezzo. In questo caso la rigidità statica e quella dinamica della macchina influenzano le deformazioni e il comportamento oscillatorio della struttura sotto l'azione delle forze dinamiche e di processo. Come si vede dalla figura 3, la precisione sul pezzo non può essere controllata direttamente in quanto il percorso di rigidità meccanico è comunque più ampio di quello meccatronico.

Nel percorso di rigidità meccanico si manifestano così oscillazioni di bassa frequenza dovute alle vibrazioni della struttura di macchina che si possono distinguere dalle oscillazioni di frequenza più elevata, dovute tipicamente ai modi di vibrare dei singoli componenti strutturali (tavola, mandrino, ecc.). Nelle macchine utensili queste ultime sono generalmente la principale causa di instabilità nel processo di asportazione (provocano



4. Esempi dei modi di vibrare di una macchina rilevanti ai fini del controllo.

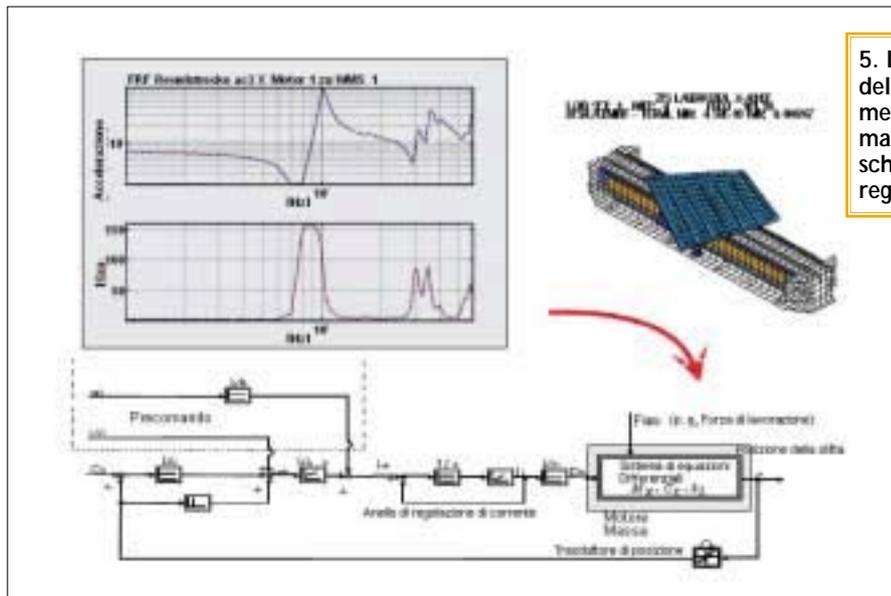
inoltre elevate rumorosità, precoce usura degli utensili, difetti di lavorazione superficiali).

Un'interessante classificazione delle oscillazioni che si manifestano nel percorso di rigidità meccatronica e che quindi vanno ad influenzare la stabilità di regolazione è raccolta in T1. Le oscillazioni di ampiezza inferiore, tipicamente, limitano il guadagno

di misura e motore, questa può essere adeguatamente controllata mediante una limitazione del Jerk.

TRATTAZIONE DEL SISTEMA COMPLESSIVO

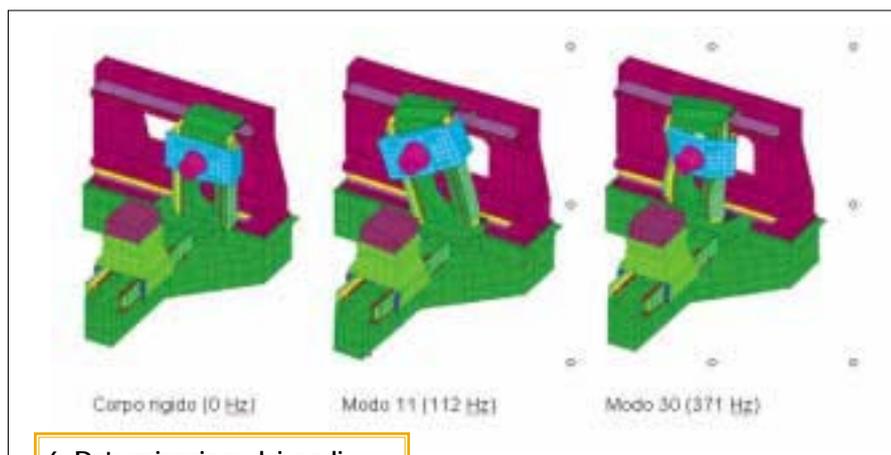
Durante la fase di progettazione dei moderni centri di lavoro, per la valutazione del comportamento statico e dinamico della macchina viene sempre più spesso impiegato il metodo degli elementi finiti (FEM). Il comportamento del sistema meccanico (figu-



5. Introduzione del modello meccanico della macchina nello schema di regolazione.

ra 4) può essere descritto attraverso un sistema di equazioni differenziali lineari, la stessa cosa avviene anche per il sistema di regolazione con struttura P e PI.

reale. D'altro canto è anche possibile introdurre le equazioni del sistema di controllo nel sistema di equazioni FEM. Il vantaggio di questo metodo è che sia le problematiche di risonanza



6. Determinazione dei modi di vibrazione fondamentali.

Da un lato quindi, come rappresentato in figura 5, è possibile introdurre il modello meccanico della macchina nello schema di regolazione dell'asse: ciò consente di svolgere un'analisi utilizzando le regole dei controlli automatici. Eventuali problematiche di risonanza possono essere studiate in modo preciso con l'ausilio di un modello FEM e il loro contributo sulla risposta caratteristica del sistema controllato può essere tenuto in debita considerazione. Eventuali provvedimenti migliorativi ottenuti operando sui parametri di regolazione possono essere testati su un modello del sistema controllato molto fedele a quello

identificate nel modello FEM sia l'efficacia dei miglioramenti costruttivi possono essere testati direttamente. L'ulteriore vantaggio è che anche la

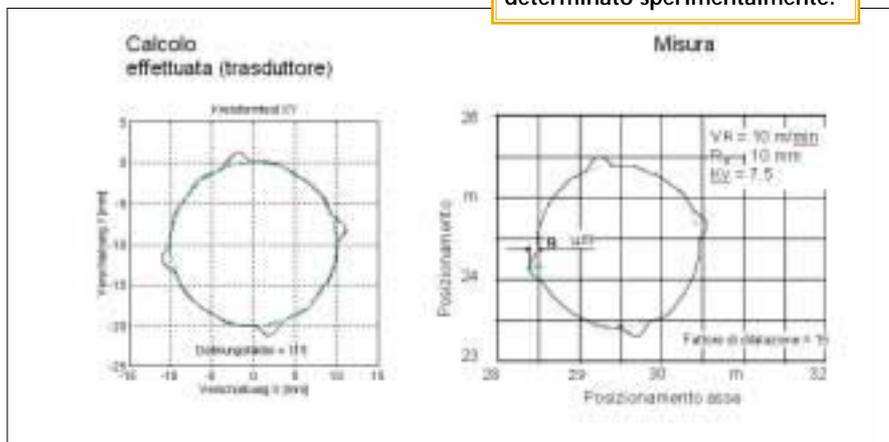
risposta caratteristica della macchina, dai riferimenti di posizione dei singoli assi, attraverso l'anello di regolazione (percorso di rigidità mecatronico) fino all'estremità dell'utensile (percorso di rigidità meccanico) può essere determinata senza problemi. Questo procedimento mecatronico viene denominato "Simulazione accoppiata" (della meccanica di macchina assieme al sistema di controllo).

FASI CHE CONTRADDISTINGUONO LA SIMULAZIONE ACCOPPIATA

Il primo passo di calcolo della simulazione accoppiata ha come obiettivo la determinazione univoca dei modi di vibrazione della meccanica, che influenzano la qualità della regolazione. La meccanica di una macchina infatti possiede un'infinità di frequenze proprie: solo alcuni di queste tuttavia vengono eccitate e/o influenzano il sistema di controllo. La figura 6 mostra alcuni dei modi principali per un centro di fresatura.

Nel passo successivo vengono calcolati i valori raggiungibili dei parametri di regolazione: questa determinazione ha luogo sulla base delle forme di vibrazione individuate al passo precedente e viene effettuata sostanzialmente attraverso calcoli condotti nel dominio della frequenza (risposte in frequenza ovvero poli e zeri del sistema accoppiato). Nel caso i parametri non consentano il raggiungimento delle prestazioni attese, è possibile

7. Test di circolarità calcolato e determinato sperimentalmente.



introdurre opportuni filtri sui riferimenti e/o sulle retroazioni delle diverse grandezze di regolazione. qualora anche queste contromisure non si rivelino sufficienti è necessario agire sulla struttura della macchina, ad esempio tramite un'opportuna scelta della posizione del sistema di misura, oppure irrigidendo alcuni elementi strutturali.

L'ultimo passo è la determinazione della precisione di posizionamento rispetto al sistema di misura e della precisione riferita al punto di contatto utensile-pezzo. Questa simulazio-

ne riunisce il modello strutturale dinamico della macchina con il modello di regolazione determinato attraverso i passi precedenti. Nella simulazione possono essere introdotte anche le eventuali forze di disturbo agenti durante la lavorazione.

Se i risultati sono in linea con le attese si può finalmente procedere alla realizzazione del prototipo di macchina, in caso contrario occorrerà rivedere la struttura meccanica per ottimizzarla ulteriormente secondo un procedimento iterativo. Il risultato viene riferito inizialmente al sistema

di misura e poi all'estremità dell'utensile. Un confronto fra il risultato dei calcoli e la misura effettuata a macchina conclusa mostra una fedeltà sorprendente (figura 7).

CONCLUSIONI

Attraverso il servizio di supporto meccatronico, Siemens si propone non come un semplice fornitore di prodotti ma come un partner in grado di fornire soluzioni complete per l'ingegneria. Assieme al progettista meccanico provvediamo a definire un modello FEM della struttura che, unito al modello del sistema di regolazione, consente di simulare il funzionamento di una macchina virtuale. Su questo si realizzano tutte le ottimizzazioni necessarie prima di passare alla realizzazione della macchina vera e propria. I vantaggi per il cliente si traducono in termini di riduzione dei tempi e dei costi di sviluppo, consentendogli un ingresso sul mercato più rapido e con macchine migliori.

A. M. Franchini, Siemens spa.

BIBLIOGRAFIA

H. Grob, J. Hamann, G. Wiegärtner, *Azionamenti elettrici di avanzamento nell'automazione industriale*. SIEMENS-Tecniche Nuove, 2002.

J. Berkemer, M. Knorr, *Gekoppelte Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung bei linearangetriebenen Werkzeugmaschinen*. Werkstattstechnik online, 2002.

E. Schäfers, J. Hamann, H-P. Tröndle, *Mechatronische Optimierung, Analyse und Simulation von Maschinen*. Vortrag anlässlich der SPS/IPC/Drives, 2001.