

# Progettazione mecatronica di macchine automatiche



**Figura 1 - Motore lineare e relativi accessori**

Paolo Tiezzi, Andrea Tilli, Alberto Tonielli

Negli ultimi anni la filosofia di progettazione delle macchine per la lavorazione e il confezionamento dei prodotti è profondamente mutata. È emerso con sempre maggiore rilevanza il problema dell'integrazione tra le parti componenti la macchina a costituire un vero e proprio sistema mecatronico. L'obiettivo di uno sviluppo mecatronico richiede l'adozione di una metodologia progettuale coerente con l'integrazione proposta. Un utile strumento è rappresentato da un Cad, utilizzabile per il progetto e la verifica di una catena cinematica e dell'azionamento che ne regola il funzionamento.

Negli ultimi anni la filosofia di progettazione degli impianti e delle macchine per la lavorazione e il confezionamento dei prodotti è profondamente mutata. È emerso con sempre maggiore rilevanza il problema dell'integrazione tra le parti componenti la macchina o l'impianto a costituire un vero e proprio sistema mecatronico [1, 2, 3, 4].

L'obiettivo di uno sviluppo mecatronico richiede l'adozione di una metodologia progettuale coerente con l'integrazione proposta, secondo criteri propri della concurrent engineering. Tuttavia, l'applicazione concreta di uno sviluppo concorrente delle varie risorse, secondo un approccio mecatronico, è stata sempre di fatto rallentata per svariati motivi. Tra questi, un'insufficiente flessibilità organizzativa degli ambiti aziendali sede del processo progettuale e la pratica indisponibilità di strumenti di prototipazione virtuale adatti allo scopo. A questo proposito occorre ricordare che, pur essendo tali mezzi sufficientemente sviluppati all'interno di aree disciplinari omogenee o affini, essi non risultano ancora idonei a integrare pienamente e in modo efficace settori diversi. Ad esempio, un Cad meccanico integra in modo efficiente la rappresentazione tridimensionale di un sistema con la sua analisi cineto-elasto-dinamica, anche a livelli estremamente raffinati; analogamente assai evoluta è l'integrazione del Cad con strumenti di analisi del relativo processo di fabbricazione o di assemblaggio (Cam e Caa); ma un'integrazione con il mondo degli azionamenti elettrici è

praticamente assente dalle funzionalità offerte dai comuni prodotti commerciali. Analizzando il settore complementare, quello degli azionamenti elettrici o dei controlli o della simulazione funzionale dell'unità di governo, troviamo strumenti analoghi, molto ben caratterizzati all'interno dello specifico dominio disciplinare ma spesso basati su una rappresentazione dei sistemi meccanici da azionare estremamente semplificata e approssimativa. Questa carenza di strumenti sviluppati secondo un'ottica integrata si nota fin dalla prima fase, peraltro decisiva per lo sviluppo d'innovazione, costituita dal progetto concettuale, che consiste nel processo di genesi e di valutazione di soluzioni progettuali complessive, in cui tutti i fattori del progetto siano già presenti e integrati. Nel caso specifico delle macchine automatiche tale processo creativo si attua sostanzialmente a due livelli, quello generale dell'architettura di sistema e quello di dettaglio di concezione e dimensionamento del singolo sottosistema di movimentazione.

Il corretto bilanciamento tra le varie componenti dell'architettura di macchina (meccanica + azionamenti e controlli) è la chiave per garantire il successo. È quindi indispensabile provvedere a una modifica di impostazione del processo di progettazione delle macchine automatiche, che va ben articolato nelle due fasi critiche di ideazione del sistema complessivo e di progettazione di dettaglio dei singoli sottosistemi. Per facilitare il processo di riqualificazione è necessario sviluppare strumenti Cad

P. Tiezzi, dottorando, Diem, Università di Bologna, paolo.tiezzi@mail.ing.unibo.it. A. Tilli, ricercatore, A. Tonielli, professore ordinario, Deis, Università di Bologna, {atonielli,atilli}@deis.unibo.it.

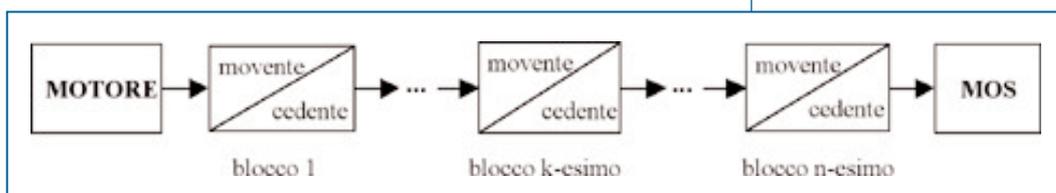
specifici, di facile utilizzo e personalizzazione, che aiutino a semplificare soprattutto la fase cruciale di concezione sistemistica della macchina. In questa fase non occorrono modelli dettagliati delle singole parti, ma va privilegiata la visione di insieme, che consenta di valutare fin dalle prime fasi del progetto la compatibilità delle soluzioni immaginate con il rispetto dei vincoli tecnologici, funzionali ed economici. Una volta stabilita un'architettura generale di riferimento, la progettazione pratica di una macchina si basa sulla scomposizione del problema in sottoproblemi distinti. Per ognuno di questi sottosistemi la progettazione deve avvalersi in pari misura di adeguati strumenti di analisi del problema, di sintesi di una soluzione ottimale, di una sua simulazione e prima verifica sperimentale. Le macchine automatiche sono caratterizzate dall'aver molti organi terminali dotati di leggi di moto proprie, destinati a trasformare il prodotto che attraversa la macchina mediante azioni coordinate e sincronizzate. Tali movimenti sono generati attraverso un certo numero di catene cinematiche meccaniche, più o meno complesse, a monte delle quali si trova un adeguato numero di attuatori, a loro

volta controllati da adeguati sistemi subordinati all'unità di governo della macchina. Uno dei principali problemi di architettura della macchina è proprio legato alla scelta della configurazione strutturale di questo sistema complessivo di generazione dei movimenti: a parità di numero e caratteristiche cinematiche e dinamiche dei movimenti terminali richiesti, la ramificazione del sistema di trasmissione e modifica del moto può essere estremamente diversificata, spostando dal dominio della meccanica a quello degli azionamenti elettrici le funzioni di ripartizione, regolazione e trasformazione del flusso energetico.

Tradizionalmente si impiegava un unico motore (o un numero assai ridotto) ed era compito di una catena cinematica, anche assai complessa, provvedere alla ripartizione, regolazione e trasformazione il moto generato fino ai singoli mezzi operativi specifici. La sincronizzazione dei movimenti era deputata a un sistema di camme meccaniche. Anche se alcuni di questi concetti più tradizionali non sono completamente superati, nella prassi attuale si adotta un frazionamento del sistema di attuazione a un certo livello (un motore per ogni gruppo significativo, con relativi meccanismi a valle di es-

so) secondo una configurazione meccatronica in senso stretto. Il controllo e la sincronizzazione dei vari movimenti avviene facendo ricorso a *camme elettroniche* e *gearing elettronici*, cioè a sistemi in cui il movimento di uno o più assi è asservito alla legge di moto di una fase *master*, virtuale o fisicamente presente, grazie a dispositivi di controllo elettronici.

In questo complicato processo di progettazione, spesso condizionato pesantemente da punti di vista personali o da filosofie aziendali precostituite, il progettista può essere aiutato dall'impiego di strumenti d'indagine metodologica e sistematica. Uno strumento utile a questo riguardo potrebbe essere un Cad di particolare configurazione operativa che, partendo dall'output desiderato (numero e caratteristiche cinematiche dei moti desiderati in uscita, grado di variabilità dei parametri di moto conseguiti al desiderato livello di flessibilità), sia in grado di generare automaticamente un certo numero di varianti progettuali relative ad



altrettante diverse architetture del sistema di generazione dei movimenti e di applicare criteri di valutazione pesata delle diverse architetture in funzione di criteri precedentemente definiti in funzione della specifica politica aziendale e degli attributi di funzionalità richiesti (flessibilità, affidabilità, costo complessivo, modularità...) [5].

Questa progettazione integrata, con il ricorso a strumenti Cad, costituisce un processo di *virtual prototyping*. Nella prassi comune gli azionamenti e i relativi sistemi di controllo sono costituiti da componenti commerciali e, pertanto, il progettista di macchine automatiche non ha la necessità di occuparsi anche della progettazione del *motion control*. Tuttavia, in alcuni casi particolari, come per esempio nella progettazione di robot o dove, in generale, vi siano sistemi di controllo dedicati, si incontrano anche problemi di sviluppo e prototipazione del sistema di controllo (*rapid prototyping*). Questa attività non riguarda solamente la definizione di un algoritmo di controllo, ma consiste anche nella effettiva implementazione di tale algoritmo su un sistema hardware/software opportuno. Il lavoro svolto intende approfondire gli aspetti relativi alla

**Figura 2 - Rappresentazione di una macchina automatica tramite schema a blocchi**

complessità di progettazione dei sistemi meccatronici, stimolando uno sviluppo in tal senso e indicando le linee guida da perseguire secondo l'opinione degli autori.

### Strumenti Cad per la progettazione integrata di sistemi meccatronici

La progettazione di una macchina automatica è un'attività articolata che impegna il progettista sotto più punti di vista tra loro concorrenti o antagonisti. Un aiuto a questa complessa opera di sintesi può venire dall'impiego di strumenti informatici specifici, che assistano il progettista nel compiere le sue scelte, permettendogli di verificarne la bontà, tenuto conto

dei vincoli e delle specifiche che presiedono al progetto in esame. Si avverte quindi la necessità di realizzare uno strumento per la progettazione assistita dal calcolatore, da impiegare per il progetto e la verifica del comportamento di una catena cinematica e dell'azionamento che ne regola il funzionamento. Definite le specifiche e i parametri di produttività della macchina automatica, il progettista

deve soddisfare queste esigenze cercando il compromesso ottimale tra flessibilità, costi e prestazioni, che costituiscono i fattori competitivi. La flessibilità operativa delle moderne macchine automatiche è legata alla necessità di poter gestire semplicemente ed efficacemente le operazioni di cambio formato.

Tale flessibilità è ottenuta ricorrendo ad azionamenti intelligenti, programmabili, a scapito di costi e/o prestazioni. Le prestazioni, intese in termini di parametri di produttività, spingono, invece, verso soluzioni meccaniche tradizionali, maggiormente dedicate al compito ma caratterizzate da maggiore rigidità funzionale. I costi, che costituiscono una forte discriminante tra le due opposte esigenze, spingono verso l'adozione di soluzioni ibride non sempre soddisfacenti. I fattori competitivi sopra indicati portano all'individuazione dell'architettura di macchina ritenuta più idonea. Contemporaneamente si pone il problema della scelta del tipo di azionamento da utilizzare per la generazione dei numerosi movimenti. L'ampio ventaglio di soluzioni disponibili va dai motori elettrici rotativi (asincrono, brushless, passo-passo, motore coppia), ai motori lineari, che

soprattutto negli ultimi anni hanno avuto importanti sviluppi, fino a considerare gli azionamenti pneumatici e oleodinamici. La scelta di una tipologia di azionamento, piuttosto che un'altra, è un elemento assai importante, che condiziona profondamente lo sviluppo successivo. Basti pensare che l'impiego di un motore lineare, invece di un motore rotativo tradizionale, determina un cambiamento notevole della catena cinematica utilizzata per portare il moto al mezzo specifico [6]. In Figura 1 è riportata l'immagine di un motore lineare con i relativi accessori. Lo strumento messo a disposizione dovrà tener conto di questi elementi, con cui l'utente si confronta, permettendo la generazione di opportune varianti progettuali e la verifica del comportamento di un cinematismo, anche con formati del prodotto differenti. Per rappresentare un valido aiuto, il software dovrà essere strutturato coerentemente alle esigenze del progettista. Nasce quindi la necessità di realizzare un'adeguata organizzazione dell'ambiente di lavoro, in modo che l'utente possa ordinare opportunamente i gruppi e i sottogruppi funzionali in cui la macchina automatica può essere suddivisa.

Definita l'architettura di macchina si passa alla progettazione delle singole catene cinematiche, per la realizzazione delle leggi di moto dei mezzi specifici. Le principali problematiche progettuali che presiedono alla sintesi cinematica sono costituite dalla scelta della tipologia della catena cinematica a valle dell'attuatore e della legge di moto all'elemento terminale della catena cinematica. Su queste due problematiche si dovrà concentrare lo sforzo compiuto in questo lavoro, nel tentativo di fornire un valido strumento di simulazione all'utente progettista. La modellazione di un cinematismo costituisce un aspetto assai critico, data la complessità del compito. È possibile adottare due filosofie differenti.

Una macchina automatica o una sua sottoparte (più o meno complessa) può essere rappresentata con uno schema a blocchi, che visualizzi come il moto prodotto da un attuatore si trasformi nel moto di un particolare blocco della macchina a contatto diretto con il prodotto. Tra movente e cedente esiste quindi una relazione matematica più o meno complessa, che lega i parametri cinematici in ingresso e in uscita dal cinematismo, come una funzione di trasferimento del blocco in questione. Questa suddivisione dei membri, relativa a una classificazione funzionale del cinematismo secondo una relazione causa-effetto, può essere utilizzata per la modellazione del cinematismo in

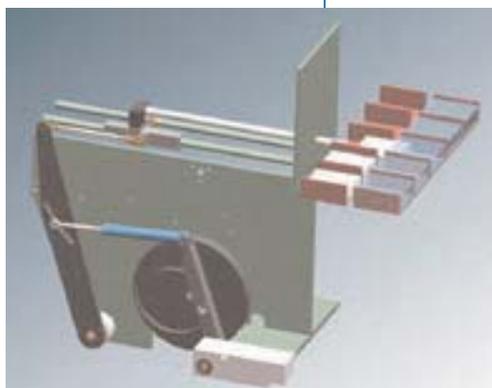


Figura 3 -  $Q_L$  esatta (tratto pieno) e approssimata (tratteggiata)

esame. Secondo questo punto di vista semplificato, un cinematismo è modellato con uno schema a blocchi (Figura 2) in cui ciascun blocco contiene i parametri cinematici e dinamici necessari a determinare il legame tra l'ingresso e l'uscita del blocco stesso.

Nel caso di semplici cinematismi, costituiti da membri elementari e standardizzati, questo tipo di modellazione conduce a risultati soddisfacenti in grado di fornire valide indicazioni. Tuttavia, man mano che la catena cinematica e i suoi membri si complicano, risulta sempre più difficile modellare efficacemente il sistema. In questo caso è auspicabile ricorrere a strumenti di simulazione più potenti, dedicati alla modellazione tridimensionale.

Ricorrendo a strumenti Cad specifici è possibile modellare realisticamente le parti meccaniche, spesso assai complesse. Un esempio è riportato in Figura 3. Il secondo importante aspetto, che determina la sintesi cinematica del meccanismo, riguarda la definizione della legge di moto del mezzo specifico a contatto diretto con il prodotto. Tale legge di moto dovrà rispettare i vincoli imposti dalle esigenze funzionali e inoltre dovrà essere valutata secondo criteri diversi, come valori massimi di velocità, accelerazione e jerk, oppure valori di coppia efficace o, ancora, differenti modalità di funzionamento dell'attuatore o contenuto in frequenza della legge stessa. La possibilità di effettuare un confronto fra diverse leggi di moto, in grado di svolgere il compito assegnato, rappresenterebbe un efficace strumento per il progettista. Successiva alla sintesi cinematica si pone la problematica della scelta dell'attuatore da impiegare e della parte di comando dello stesso. Tale scelta potrebbe essere convenientemente guidata da una procedura di ottimizzazione che, in base alle scelte precedentemente fatte, generi una serie di possibili soluzioni scelte all'interno di database di azionamenti, sistemi di controllo e altri componenti commerciali (esempio riduttori) che il progettista può utilizzare. La soluzione di primo tentativo potrebbe, tuttavia, presentare dei problemi responsabili di un funzionamento non corretto e diverso da quello ideato. Le cause imputabili sono legate al comportamento dinamico del sistema, che può differire significativamente da quello statico considerato per generare la soluzione di primo tentativo. I problemi sono dovuti al comportamento non corretto della parte elettronica di controllo dell'azionamento e al comportamento elastodinamico delle parti meccaniche, le quali possono soffrire l'insorgere di fenomeni vibratorii

legati alle frequenze proprie di risonanza [7, 8]. Al fine di migliorare la soluzione di progetto, un prezioso strumento sarebbe dato dalla possibilità di simulare la dinamica del sistema, sia della parte di controllo sia del meccanismo, i cui risultati contribuirebbero all'affinamento per passi successivi del cinematismo. L'implementazione dell'ambiente Cad da sviluppare potrebbe avvenire sfruttando le enormi potenzialità di alcuni ambienti per la simulazione e lo studio di sistemi reali già in commercio, come ad esempio la piattaforma software Matlab/Simulink oppure quella Modelica/Dymola. Questi strumenti sono in grado di fornire sia un vasto insieme di algoritmi e applicazioni specifiche organizzate in toolbox sia le potenzialità grafiche utili alla creazione di un'adeguata interfaccia utente.

A partire dal nucleo di funzioni e procedure messe a disposizione da questi ambienti di lavoro (*kernel* del programma) si potrà realizzare un software di più alto livello, concepito come un toolbox e specificatamente orientato per la progettazione di macchine automatiche guidata al computer. Le potenzialità del software sviluppato potranno essere allargate ricorrendo ad altri Cad commerciali, in grado di soddisfare esigenze più spinte di simulazione come la modellazione tridimensionale di cinematismi e la loro analisi cinematica e dinamica.

Sarà compito del software sviluppato occuparsi dell'interfaccia tra il Cad e l'ambiente di lavoro. Volendo scendere maggiormente nello specifico può essere utile delineare con maggior dettaglio le specifiche funzionali che il software dovrebbe implementare. Le maggiori funzionalità offerte dal software dovrebbero essere quelle riportate di seguito.

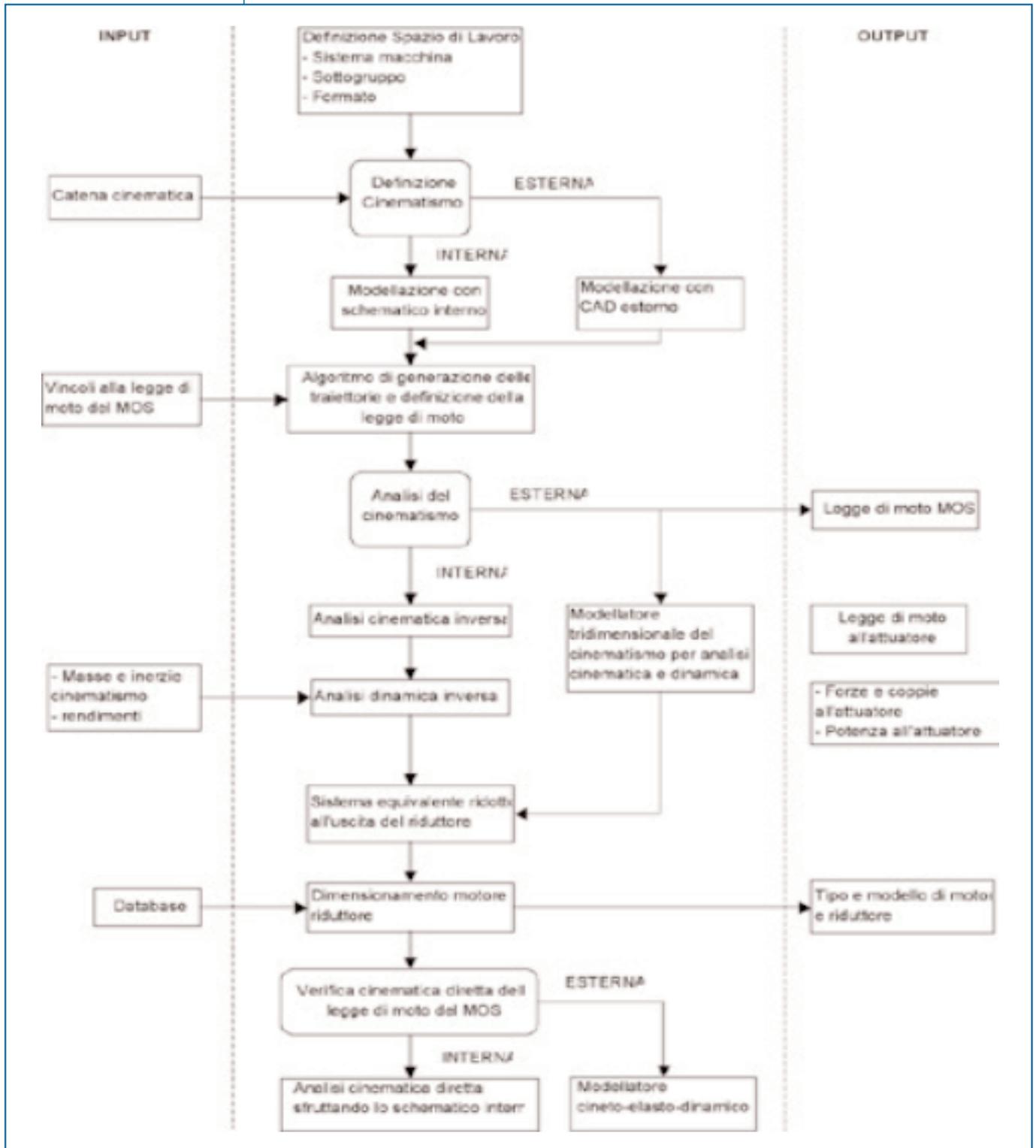
- *Rappresentazione di una macchina automatica.* Attraverso la costruzione di una struttura gerarchica grazie alla quale organizzare il lavoro, suddividendo il macro-sistema macchina in sottogruppi, ciascuno dei quali identifichi un particolare cinematismo. Ciascun cinematismo dovrebbe poter essere analizzato secondo impostazioni differenti, che costituiscono i vari formati di simulazione.

- *Algoritmo per la generazione dei profili di moto secondo le più svariate leggi utilizzate nel mondo industriale (spline, polinomiali, composte...).* L'algoritmo per la generazione dei profili di moto dovrà essere in grado di implementare le più svariate leggi utilizzate nel campo delle macchine automatiche e dell'automazione, permettendo all'utente un'ampia libertà di scelta nel decidere le caratteristiche del movimento che vuole utilizzare. Come riferimento

per lo sviluppo di questa parte si può fare riferimento ai testi [9, 10] cui si rimanda per una conoscenza più approfondita dell'argomento. L'algoritmo di generazione delle traiettorie potrà essere un interpolatore con lo scopo di generare delle leggi di moto periodiche, da utilizzare per la realizzazione di profili di camme meccaniche o per generare profili da eseguire

su servomotori asserviti in asse elettrico (Slave), nella forma di tabella di punti da inviare al dispositivo di azionamento e controllo. Lo schema di funzionamento di tale algoritmo dovrebbe essere, in generale, basato sull'inserimento di vincoli (posizione e/o velocità e/o accelerazione) in corrispondenza di determinati valori della fase di macchina (Fase Master). In

Figura 4 - Flow-chart delle operazioni da svolgere



base a tali vincoli l'algoritmo potrà eseguire l'interpolazione della traiettoria calcolando il profilo di posizione, velocità, accelerazione e jerk passante per essi.

- *Analisi cinematica diretta.*
- *Analisi cinematica inversa.*
- *Analisi dinamica inversa.*
- *Implementazione di un algoritmo per il dimensionamento del blocco motore e riduttore.*

Le varie funzionalità implementate potrebbero essere realizzate per mezzo di:

- *Integrazione con un sistema di computer-aided design (Cad) per assiemi meccanici e modellazione di parti.*

Il software potrebbe essere strutturato in modo da permettere all'utente di poter scegliere tra due alternative di modellazione. La prima possibilità consisterebbe nell'effettuare la definizione del cinematismo e le analisi, cinematica e dinamica inversa, utilizzando le funzionalità interne al programma. La catena cinematica potrebbe essere modellata, in questo caso, per mezzo di uno schema a blocchi basato su librerie predefinite. Le varie analisi condotte sarebbero svolte sfruttando lo schematico creato. La seconda possibilità offerta dal software dovrebbe permettere il ricorso a strumenti Cad esterni, con cui il programma dovrebbe essere in grado di interagire, dando modo all'utente di sfruttare le enormi potenzialità di modellazione offerte da Cad specifici per il disegno assistito dal calcolatore e per la modellazione tridimensionale di cinematismi.

- *Introduzione e gestione di database di motori, convertitori e riduttori.*
- *Procedura di scelta dei riduttori e dei motori adatti a muovere la catena cinematica tra quelli presenti all'interno di database.*

Il toolbox potrebbe essere convenientemente strutturato in moduli, ciascuno preposto allo svolgimento di un compito specifico. I vari moduli dovrebbero poter ricevere dal modulo precedente le informazioni di cui necessitano in ingresso ed essere in grado di dare in uscita le informazioni necessarie all'implementazione del blocco successivo e quelle che l'utente richiede. Una struttura di questo tipo è in grado di mantenere una certa indipendenza tra i vari blocchi funzionali, grazie cui è possibile by-passare un modulo e sfruttare alcune potenzialità offerte da strumenti esterni al programma di base, oppure è possibile aggiornare e/o sostituire un blocco mantenendo i restanti moduli. Nella Figura 4 è illustrato il diagramma di flusso delle operazioni da svolgere per l'implementazione delle funzionalità precedentemente elencate.

## Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati approfonditi gli aspetti relativi alla progettazione e verifica di una catena cinematica e dell'azionamento che ne regola il funzionamento, allo scopo di stimolarne lo sviluppo da un punto di vista mecatronico e indicando le linee guida da perseguire secondo l'opinione degli autori.

Le principali problematiche progettuali, che presiedono alla sintesi cinematica, sono costituite dalla scelta della tipologia della catena cinematica a valle dell'attuatore e della legge di moto dell'elemento terminale del cinematismo stesso. Gli elementi essenziali e di maggior innovazione, dei quali è maggiormente sentita la necessità di sviluppo, riguardano la modellazione tridimensionale del cinematismo, la modellazione dell'azionamento che ne governa il funzionamento e la verifica della legge di moto ipotizzata. In lavori tuttora in corso gli autori intendono applicare le considerazioni svolte e le proposte presentate nello sviluppo di uno strumento Cad idoneo.

## Bibliografia

- [1] P.L. Magnani, *Meccanismi per macchine automatiche*, Utet, 1986.
- [2] R.L. Norton, *Design of machinery*, McGraw-Hill, 1992.
- [3] F.Y. Chen, *Mechanism and Design of Cam Mechanisms*, Pergamon Press Inc., 1982.
- [4] J. Angeles, C.S. Lopez-Cajun, *Optimization of cam mechanisms*, Kluwer Academic Pub., 1991.
- [5] A. Tonielli, *Using Cad tools for design of Motion Trajectories and selection of Electric Drives*, Proc. Tissue World 1999, Nice, March 1999.
- [6] F. Lotti, M. Salomon, G. Vassura, A. Zucchelli, *Selection of linear motors for high-speed packaging machines*, Aim '01, Ieee-Asme Conf. On Advanced Intelligent Mechatronics, July 8-11, 2001, Como.
- [7] A.S. Gutman, *To avoid vibration - try this new cam profile*, Prod. Eng. Dec. 25: 42-48, 1961.
- [8] A. Grilli, L. Onofri, *Caratterizzazione del carico meccanico*, Automazione e Strumentazione, Novembre 1997.
- [9] C. Melchiorri, *Traiettorie per azionamenti elettrici*, Progetto Leonardo, ed. Esculapio, Bologna, 2000.
- [10] A. Maselli, *Macchine industriali, scelta della legge di moto*, Automazione e Strumentazione, Novembre 1997.