

Controllo riconfigurabile di sistemi manifatturieri



Manipolatore a cinematica parallela per operazioni di "pick & place" sviluppato presso Itia-Cnr

Emanuele Carpanzano, Dario Dallefrate, Francesco Jatta

Si propone una metodologia di sviluppo basata su modelli di riferimento formali per il progetto del controllo di sistemi manifatturieri. Tali modelli sono conformi a emergenti standard internazionali e sfruttano concetti propri del paradigma orientato agli oggetti. Attraverso la metodologia presentata, si semplifica il progetto di sistemi di controllo complessi, garantendone buone proprietà di manutenibilità, riusabilità e riconfigurabilità. Quale esempio applicativo si discute il progetto del controllo di una cella manifatturiera.

Al giorno d'oggi le imprese devono affrontare cambiamenti continui e imprevedibili delle richieste del mercato, quindi, per rimanere competitive, esse devono possedere sistemi di produzione che siano preparati a tali repentini cambiamenti. A tal fine risulta cruciale la disponibilità di sistemi di automazione affidabili e flessibili [3]. Inoltre, la facilità di riconfigurazione e riutilizzo di soluzioni di automazione già sviluppate costituisce un elemento fondamentale per ridurre i costi e i tempi necessari per realizzare un nuovo sistema di produzione, o per modificarne uno esistente [4]. In questo contesto, l'adozione di metodologie di sviluppo che supportino il progetto strutturato e la verifica dell'intero sistema di automazione risulta di primaria importanza [7, 8]. In realtà, a causa della complessità insita nel progetto di un sistema di automazione è necessario introdurre linee guida, metodi e strumenti che permettano di condurre il progetto in modo sistematico e rigoroso. In questo articolo si propone una metodologia di progetto strutturata basata su modelli di riferimento formali [5], che sfruttano il paradigma orientato agli oggetti [10], e che sono compatibili con emergenti standard internazionali, in modo da garantire interoperabilità e intercambiabilità. In particolare, nel presente lavoro è proposto un modello architetturale del sistema di controllo derivato dall'analisi dei principali standard emergenti (Osaca [12], Omac [2], Osec [9]), mentre il modello funzionale utilizzato è basato sullo standard Iec 61499 [15].

Il ciclo di vita del progetto

Un elemento fondamentale nello sviluppo di un sistema di automazione, attraverso una metodologia strutturata, è il ciclo di vita del progetto che stabilisce l'ordine delle fasi che caratterizzano lo sviluppo, e i criteri di transizione per passare da una fase a quella successiva, insieme ai dati e ai modelli che devono essere prodotti in ogni fase.

Nel presente lavoro viene utilizzato il ciclo di vita dapprima definito in [7] e successivamente dettagliato in [3, 8]; esso è basato sulle fasi seguenti.

- *Definizione del sistema*: si descrive il processo da automatizzare, e si definiscono le attività da realizzare e gli obiettivi del sistema di automazione.

- *Definizione delle specifiche del sistema di controllo*: si definiscono i compiti e le funzioni essenziali del sistema di controllo. Al fine di raggiungere gli obiettivi di unificazione, riutilizzo e tracciabilità, il sistema di automazione dovrà osservare uno schema che sia consistente durante le successive fasi del ciclo di vita del progetto. Perciò si adotta lo schema di riferimento descritto in Figura 1, il quale è strutturato secondo una gerarchia di differenti livelli (impianto, area, cella, unità, dispositivi), basati su di una scomposizione successiva di obiettivi specificati ad alto livello fino ad azioni di controllo di livello elementare.

- *Progetto del sistema di controllo*: i sistemi di supervisione e controllo vengono svilup-

E. Carpanzano, ricercatore, D. Dallefrate, ricercatore, F. Jatta, ricercatore; Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano.

pati secondo opportuni modelli di riferimento formali, sia per il progetto architettuale sia per quello funzionale.

• *Integrazione e verifica del sistema di controllo*: viene verificata l'aderenza delle funzioni di controllo progettate relativamente alle specifiche. Questo obiettivo è raggiunto attraverso opportuni strumenti di analisi formale e/o di simulazione.

• *Integrazione del sistema e collaudo*: il codice di controllo viene generato, per quanto possibile in modo automatico, dai modelli di riferimento formali, dopo di che viene verificato se il sistema di controllo funziona correttamente sui dispositivi, se tutte le attività possono essere condotte, e se le specifiche iniziali sono soddisfatte.

Il modello di riferimento per l'architettura del sistema di controllo

Per definire il modello di riferimento per l'architettura del sistema di controllo, sono stati analizzati diversi standard emergenti per la rappresentazione di architetture di controllo aperte [13]. In particolare, le caratteristiche principali degli standard considerati sono riportati di seguito.

• *Osaca* (Open System Architecture for Controls within Automation systems) [12] è un progetto europeo basato sulla definizione di tre elementi:

- un'architettura di riferimento che descrive i differenti moduli del Cnc (Computer Nume-

rical Control) definendone le interfacce e il comportamento interno in termini di automi a stati finiti;

- un'interfaccia di programmazione indipendente dalla specifica piattaforma (hardware, sistema operativo, sistema di comunicazione) che consente di sviluppare applicazioni "Osaca compliant" in modo indipendente dal costruttore;

- una piattaforma in grado di garantire l'interoperabilità dei singoli moduli ottenuta su di un sistema di comunicazione client-server secondo un modello Iso/Osi, e in grado di gestire la configurazione dell'intero sistema in run-time, e durante le fasi di avvio e spegnimento.

• *Omac* (Open Modular Architecture Controller) [2] è un progetto americano promosso e supportato da aziende del settore automobilistico per lo sviluppo di un sistema di controllo per l'industria manifatturiera con particolare attenzione al settore dell'automobile. È basato sui seguenti elementi:

- un'architettura basata su componenti per garantire la modularità;

- i componenti sono definiti tramite funzioni di interfaccia e comportamento interno (descritto tramite un automa a stati finiti);

- l'integrazione dei componenti in un sistema distribuito è garantita tramite apposite infrastrutture di comunicazione (Com/Dcom, Corba).

• *Osec* (Open System Environment for Controllers) [9] è un progetto promosso da un

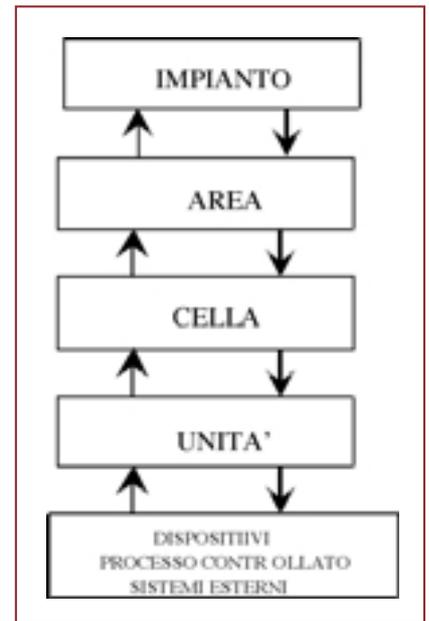


Figura 1 - Livelli gerarchici del sistema di controllo

Confronto tra gli standard Osaca, Omac e Osec

		Osaca	Omac	Osec
Api	Tipo	Object-oriented	Object-oriented	Function calls
	Linguaggio di programmaz.	C++	Idl	C
Architettura di riferimento	Tipo	Client-Server	Basato su componenti	Basato su componenti
	Moduli funzionali	Hmi, Motion Control Manager, Motion Control, Spindle Control, Axis Control, Coordinator Machine System, Coordinator Machine Unit, Logic Control Services, Adaptation to Nc	Task Coordinator, Part Program Translator, Axis Group, Axis, Kinematics Models, Control Law, I/O Points, Human Interface Agents, Communication models	Hmi, Resource Management, Motion Generation, Machine Control, Device Control
	Comportamento interno dei moduli	Specificato tramite automi a stati finiti	Specificato tramite automi a stati finiti	Non specificato
Infrastruttura	Piattaforma di sistema	Specifica Osaca	Qualunque	Windows
	Piattaforma di comunicazione	Specifica Osaca	Proxy agent middleware (Dcom, Corba)	Specifica Osec

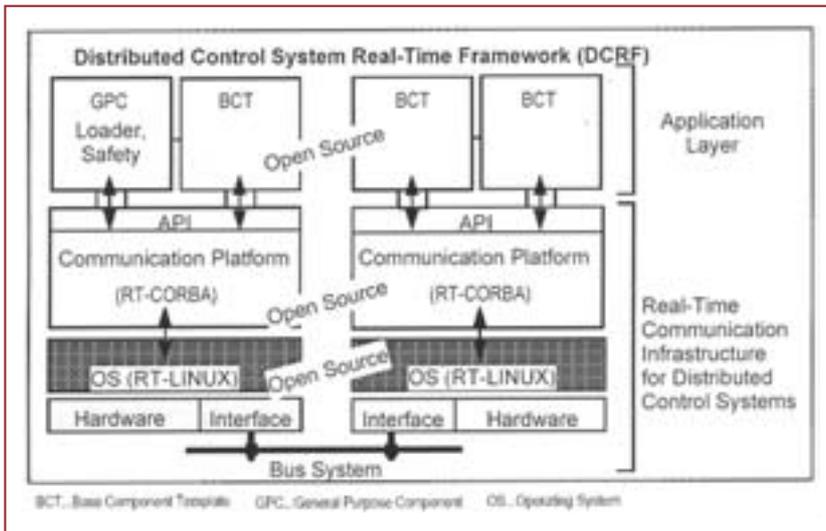


Figura 2 - Architettura per sistemi di controllo aperti e distribuiti proposta nel progetto europeo Ocean

consorzio giapponese di costruttori di macchine utensili e sistemi manifatturieri. L'architettura è definita da un insieme di blocchi funzionali che incapsulano le funzionalità del Cnc. L'attenzione è rivolta verso l'interfaccia di programmazione dei singoli moduli chiamata Message Coordination Field. Nel 1999 il progetto Jop (Japan Open systems - Promotion group) ha pubblicato delle Api (Application Program Interface) standard per l'interfacciamento del kernel del Cnc con interfacce uomo-macchina Pc-based. L'insieme di queste interfacce, dette Papi, sono state progettate per essere indipendenti dalla particolare architettura del Cnc.

Un sintetico confronto tra questi differenti standard è riportato nella Tabella. Si può osservare come detti standard non siano compatibili l'uno con l'altro. In particolare, i modelli funzionali proposti per l'architettura del sistema di controllo sono differenti.

Ad oggi, l'unico sforzo in corso per la loro integrazione consiste nella definizione di un'Api comune a livello di interfaccia uomo macchina (Hmi, Human Machine Interface) all'interno di un progetto tuttora in corso denominato "Global Hmi". Recentemente, a partire dall'agosto 2002, un nuovo progetto di ricerca europeo denominato Ocean (Open Controller Enabled by an Advanced real-time Network) ha ripreso la problematica inerente i sistemi di controllo aperti e distribuiti considerando il paradigma emergente dello sviluppo software Open Source [16].

Nello specifico gli obiettivi di tale progetto saranno raggiunti in due fasi. La prima concerne lo sviluppo di una piattaforma software per la realizzazione di sistemi di controllo aperti e distribuiti basata su sistemi di comunicazione standard quali Corba (Common Object Request Broker) e sistemi operativi open source quali Linux. Alla fine del progetto, tale infrastruttura sarà resa pubblicamente disponibile in accordo con le politiche di licenza del software Open Source e consentirà una facile integrazione di componenti sviluppati da terzi unitamente a un supporto per la comunicazione real-time indispensabile per applicazioni di controllo per macchine utensili.

La seconda fase del progetto prevede la definizione di un'architettura estesa per controlli numerici aperti e distribuiti basati su componenti. In dettaglio, i singoli componenti non saranno distribuiti come software Open Source, ma le loro interfacce, opportunamente standardizzate, saranno rese pubblicamente disponibili. In questo modo sarà possibile ottenere il duplice risultato di proteggere il know-how specifico dei singoli produttori di sistemi di controllo e di garantire la sostituzione o l'integrazione di componenti di terzi all'interno del sistema.

In questo lavoro viene presentato un nuovo modello di riferimento per l'architettura del sistema di controllo basato sugli aspetti comuni degli standard sopraccitati. Tale modello è rappresentato in Figura 3a, dove sono illustrati i moduli principali: Hmi e strumenti di Configurazione, Controllo logico, Pianificazione del movimento e Controllo Asse. Questi modelli sono successivamente dettagliati nelle Figure 3b, 3c e 3d.

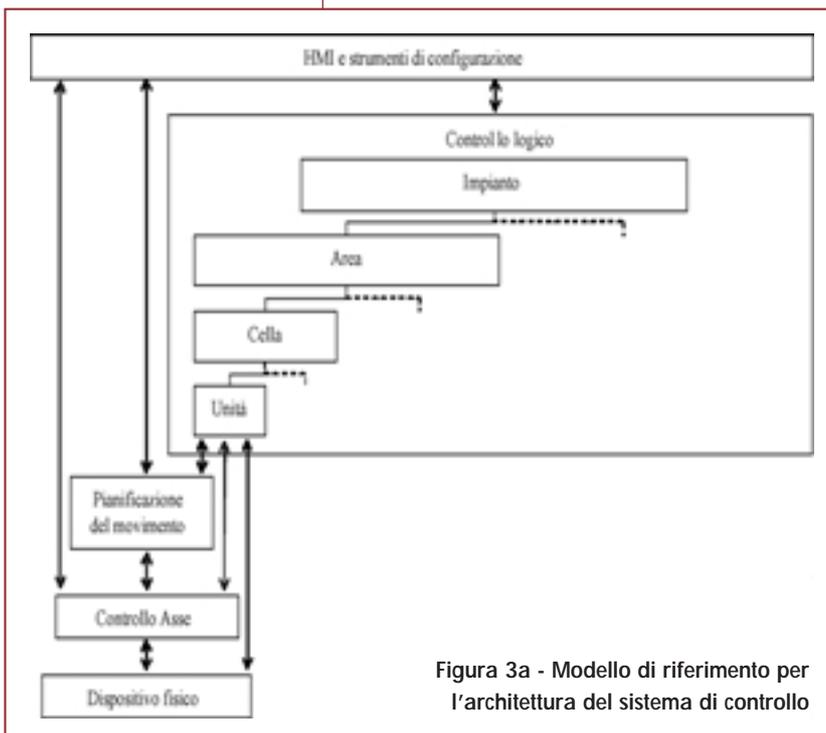


Figura 3a - Modello di riferimento per l'architettura del sistema di controllo

Il modulo di controllo logico è strutturato in differenti livelli gerarchici secondo la scomposizione funzionale dell'impianto in aree, celle e unità [5]. In particolare ogni livello gerarchico è costituito da tre rami funzionali agenti in parallelo, basati sul concetto di controllo in retroazione come mostrato in Figura 3b [3]. Si distinguono tre flussi di controllo paralleli:

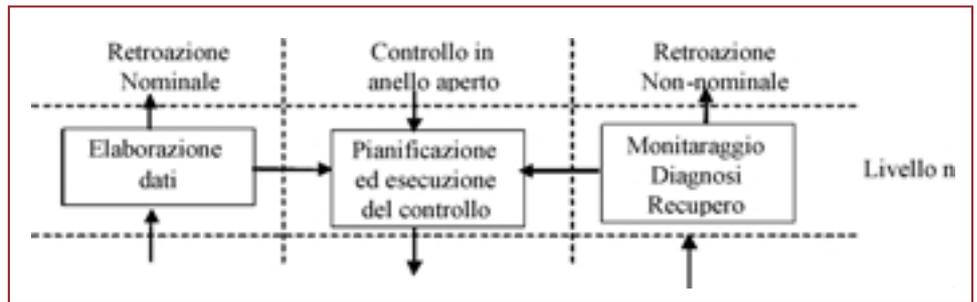


Figura 3b - Generico livello gerarchico del modulo di controllo logico

il controllo in anello aperto, che si occupa della pianificazione e della esecuzione del controllo, la retroazione nominale, che elabora opportunamente i dati forniti dei sensori ai fini del controllo, e la retroazione non nominale, che gestisce eventuali situazioni non nominali individuando le dovute strategie di recupero per mezzo di operazioni di monitoraggio e diagnosi. Si noti inoltre che ogni singolo livello, area, cella o unità può essere ricorsivamente strutturato sui più livelli gerarchici, per esempio il modulo di controllo logico di un robot può essere strutturato sui livelli gerarchici di missione, task e azione, e ogni sottolivello risulta suddiviso nei tre rami funzionali paralleli di Figura 3b. Per il modulo di pianificazione del movimento possono essere distinti i seguenti sotto-moduli (Figura 3c):

- *lo schedulatore*: coordina i sottomoduli per mezzo di un automa a stati finiti e dialoga a livello superiore con il controllo logico;
- *l'interprete*, traduce una lista di istruzioni di moto/lavorazioni (part/task program) in un formato interno favorevole per le successive elaborazioni;
- *il controllore di traiettoria*, corregge i dati della traiettoria da trasferire ai livelli inferiori (controllo asse) monitorando la differenza tra traiettoria pianificata e traiettoria effettivamente percorsa nello spazio operativo;
- *l'ottimizzatore di traiettoria*, opera un'analisi "in avanti" sul percorso che l'utensile dovrà seguire per calcolare un avanzamento ottimo dell'end effector compatibile con i limiti di velocità ed accelerazione sui giunti (nei controlli numerici per macchine utensili questo modulo è noto con il nome di "look-ahead");
- *l'interpolatore*, campiona la traiettoria pianificata imponendo all'utensile una prefissata legge di moto;
- *la cinematica*, calcola la cinematica inversa determinando i riferimenti da fornire al modulo

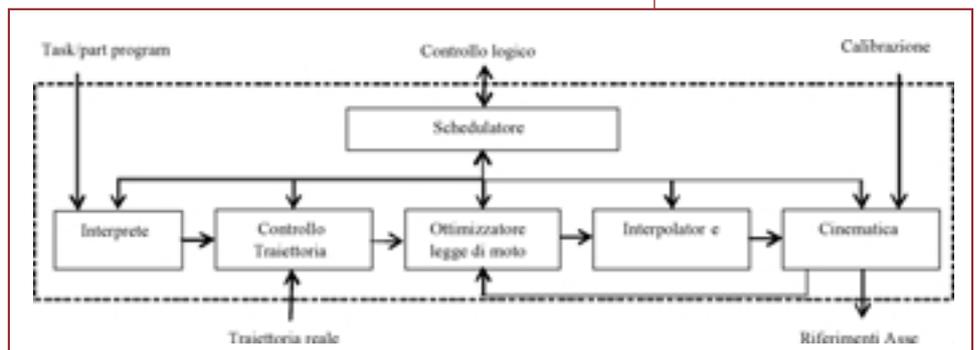
di controllo asse e verifica che la traiettoria programmata sia all'interno del volume di lavoro della macchina controllata. In alcune situazioni, in particolare quando è richiesto un aggiornamento della posizione dell'end effector sulla base delle posizioni attuali degli assi, questo modulo risolve anche il problema cinematico diretto (ad esempio durante la ricerca della posizione di home).

Il meccanismo di ereditarietà può essere sfruttato per specializzare alcuni dei sottomoduli definiti in relazione alle esigenze della specifica applicazione. Per esempio il modulo di interpretazione del part program può essere specializzato per realizzare traduttori per differenti linguaggi (ad esempio lo standard Iso 6983 noto come "G-Code" o l'Iso 14649 noto come "Step-Nc"). Un altro esempio può essere rappresentato dai diversi moduli di cinematica per macchine seriali o parallele che possono essere derivati da un più generale modulo di cinematica attraverso un meccanismo di ereditarietà.

Il modulo di controllo assi è descritto in Figura 3d; con riferimento a questa Figura possono essere distinti i seguenti sotto-moduli:

- *stimatore dinamico*: cerca di prevedere, utilizzando i valori di riferimento e/o attuali delle coordinate ai giunti, il comportamento dinamico del processo sotto controllo secondo un modello precedentemente definito e calibrato;
- *controllore del moto*: comanda gli attuatori secondo un opportuno algoritmo rice-

Figura 3c - Modulo di pianificazione del movimento



vendo come dati i valori di riferimento proveniente dal pianificatore del moto, e la dinamica stimata dall'apposito blocco con lo scopo di mantenere la traiettoria eseguita il più vicino possibile a quella di riferimento. Diverse leggi di controllo possono essere derivate dalla più generica (per esempio un Pid di posizione) in tecniche specializzate a seconda dello specifico compito da eseguire (controllo a dinamica inversa o controllo d'impedenza). Si noti che schemi di controllo avanzati possono richiedere la calibrazione dei parametri cinematici e dinamici del sistema;

- *Incapsulamento*: ogni modulo nasconde i suoi algoritmi e le sue variabili interne agli altri componenti del sistema di controllo, in particolare ogni modulo interagisce con gli altri tramite interfacce standard.
 - *Aggregazione*: i moduli principali che costituiscono l'architettura del sistema di controllo sono ottenuti attraverso l'aggregazione di sottomoduli più semplici.
 - *Ereditarietà*: componenti specializzati possono essere derivati da altri di tipo generale.
- Come verrà illustrato in relazione a un esempio applicativo mostrato successivamente, l'adozione dei modelli qui proposti semplifica notevolmente la definizione di complessi sistemi di automazione, e ne migliora il riutilizzo così come la riconfigurabilità: infatti, qualora uno o più moduli funzionali debbano essere modificati o sostituiti, è possibile intervenire a livello dei soli moduli coinvolti, invece che dell'intero sistema, riducendo significativamente i tempi ed i costi di sviluppo.

Il modello di riferimento per il progetto funzionale

Lo standard Iec 61499, che definisce i blocchi funzionali per processi industriali di misura e controllo, viene qui introdotto per sviluppare dettagliati modelli funzionali per il software del sistema di controllo, e per definire la distribuzione delle funzioni di supervisione e di controllo sui dispositivi fisici [14, 15]. Lo standard Iec 61499 è basato su un modulo fondamentale, il function block (FB), che rappresenta un'unità funzionale di software associata ad una risorsa hardware del sistema di controllo. Come mostrato in Figura 4, un'istanza di un FB è caratterizzata da: nome di tipo e nome di istanza, insiemi di eventi e di dati in ingresso/uscita, dati interni, una Execution Control Chart (Ecc) che consiste di stati, transizioni ed azioni, e che invoca l'esecuzione di algoritmi in risposta ad eventi in ingresso; e da un insieme di algoritmi associati agli stati dell'Ecc.

L'esecuzione degli algoritmi è invocata dall'Ecc in risposta a eventi in ingresso. Quando viene pianificata l'esecuzione di un algoritmo vengono letti gli ingressi e i valori dei dati interni e si calcolano nuovi valori per le uscite e per i dati interni medesimi tramite l'algoritmo eseguito. Inoltre, a seguito dell'esecuzione di un algoritmo, l'Ecc genera zero o più eventi in uscita secondo il caso. Un'applicazione viene definita connettendo

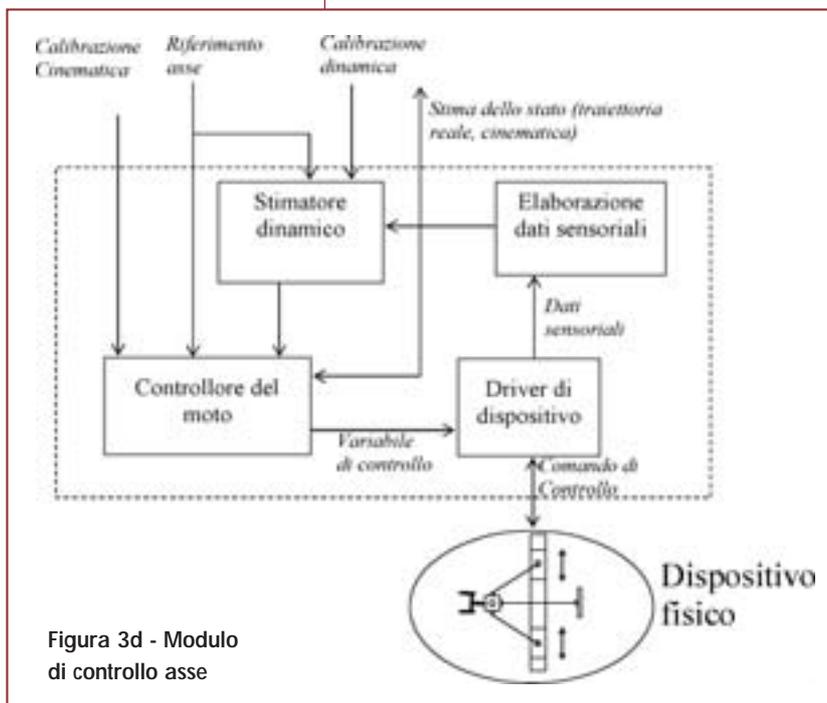


Figura 3d - Modulo di controllo asse

- *driver di dispositivo*: fornisce lo stato della macchina attraverso le letture dei sensori che vengono poi processate tramite apposito blocco di elaborazione dei segnali;
 - il blocco di *elaborazione dati sensoriali* raccoglie i dati "grezzi" dal campo ed elabora una stima accurata o "noise free" dello stato del sistema (posizione, velocità ed accelerazione degli assi o dell'organo terminale).
- Il modello proposto è basato sui seguenti concetti propri dell'approccio orientato agli oggetti [3, 10]:
- *Modularità*: un sistema di controllo complesso è diviso in sottomoduli più semplicemente gestibili.
 - *Gerarchia*: i moduli sono strutturati su diversi livelli gerarchici secondo un approccio di scomposizione funzionale di tipo top-down.

opportunamente più FB. Per quanto riguarda la configurazione, un'applicazione può essere distribuita su diversi dispositivi fisici per il controllo. Un dispositivo utilizza la relazione causale specificata dall'applicazione per determinare le risposte appropriate agli eventi in ingresso. Inoltre nello standard Iec 61499 una risorsa è considerata come una suddivisione logica all'interno della struttura software (e possibilmente anche hardware) di un dispositivo che esercita un controllo indipendente delle proprie operazioni. Secondo la normativa ogni istanza di un FB è associata a una singola risorsa.

Con le definizioni fornite, l'architettura di un sistema di controllo manifatturiero può essere modellata come un insieme di dispositivi, divisi in risorse, interconnessi e comunicanti tra di loro per mezzo di una o più reti di comunicazione, mentre le funzioni esercitate dal sistema sono modellate come applicazioni. L'adozione dello standard Iec 61499 come modello funzionale agevola la definizione di modelli riutilizzabili e riconfigurabili, dal momento che sono fortemente sfruttati i principi di modularità, incapsulamento e standardizzazione delle interfacce [10].

Progetto del sistema di controllo di una cella manifatturiera

In questa sezione la metodologia presentata è applicata al progetto del sistema di controllo di una cella manifatturiera all'interno della quale viene eseguita una operazione di palletizzazione. In particolare, il progetto in questione viene illustrato passando in rassegna le differenti fasi del ciclo di vita del progetto introdotte nel paragrafo *Il ciclo di vita del progetto*.

Definizione del sistema

La cella considerata è raffigurata in Figura 5 (viste dall'alto e di fianco). In questa cella i pezzi provenienti da una precedente unità produttiva (posizione A) sono movimentati tramite un nastro in ingresso e raccolti (in B) per mezzo di un manipolatore "pick & place" riconfigurabile realizzato tramite cinematica parallela (Pkm, Parallel Kinematic Machine) mostrato nella Figura in Apertura, il quale si occupa di disporli all'interno di uno slot vuoto di un apposito pallet (in C).

Quando il pallet viene completamente riempito, un nastro trasportatore lo conduce alla prossima stazione di lavorazione (D). Per ultimo un nuovo pallet vuoto viene allestito da

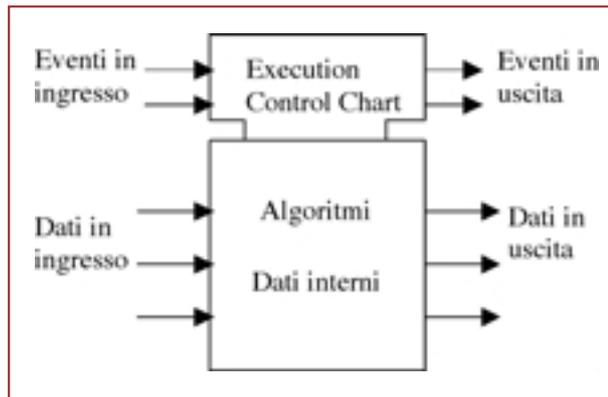


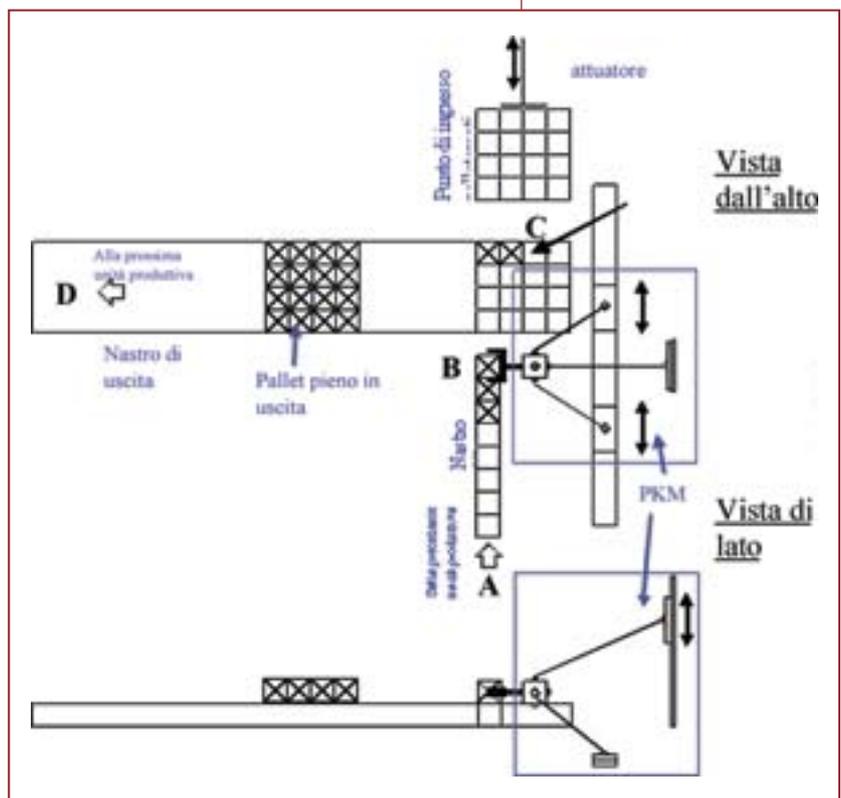
Figura 4 - Modello di FB

un apposito attuatore. Il manipolatore pick & place è riconfigurabile in quanto all'occorrenza possono essere aggiunti gradi di libertà (si veda [11] per ulteriori dettagli su questa macchina). Nello scenario descritto il manipolatore è mostrato nella sua configurazione standard (tre gradi di libertà, ad esempio: traslazioni lungo gli assi X, Y e Z).

Definizione delle specifiche del sistema di controllo

Seguendo lo schema proposto in Figura 1, il sistema di controllo è strutturato descrivendo ogni elemento della cella come un'unità: nastro in ingresso, pick & place Pkm, attuatore e nastro in uscita. Il comportamento deside-

Figura 5 - Layout di cella



rato è dapprima descritto tramite specifiche espresse in linguaggio naturale e in seguito viene tradotto in regole formali. Come esempio le regole di specifica del robot parallelo sono di seguito riportate:

```
Pkm formal control specification

while(operating){
  MoveTo(B);
  while(!isPieceAvailable()){
    wait(WAIT_TIME);}
  if (!grasp()) {errCode = GRA-
SP_FAILURE;break;}
  C = nextAvailableSlot();
  MoveTo(C);
  if (!release()){errCode = RE-
LEASE_FAILURE; break;}}
// errCode handling ...
```

ta ed attuatore) ha un proprio controllo asse dedicato. I segnali di controllo corrispondenti, sono forniti tramite differenti livelli gerarchici costituenti il sistema di controllo, dal controllo logico fino ad arrivare ai dispositivi fisici e viceversa. Mentre la Pkm ha una struttura di controllo più complessa, contenente anche il modulo di pianificazione del movimento (MP), i due nastri possiedono un set ridotto di moduli di controllo (il modulo MP non serve), e l'attuatore è direttamente gestito dal controllore logico di cella (il controllore di unità ed il pianificatore di traiettoria non sono necessari).

Il modello funzionale del sistema di controllo è progettato secondo il formalismo specificato dalla Iec 61499. In particolare la cella può essere rappresentata tramite un FB composto come mostrato in Figura 7. In Figura 8 viene mostrato l'Ecc del FB relativo alla Pkm: esso consiste sostanzialmente di una sequenza di cinque stati discreti, da 1 a 5, che rappresentano le operazioni del manipolatore, mentre gli stati 6 e 7 verranno utilizzati per scopi di diagnosi dei guasti e per le relative strategie di recupero, come discusso nel paragrafo successivo. Secondo lo standard Iec 61499 alle transizioni dell'Ecc sono associate espressioni logiche, mentre agli stati dell'Ecc sono associati algoritmi e/o eventi [15]. Nel FB relativo alla Pkm, gli algoritmi *MoveTo*, *Grasp* e *Release*, sono pianificati dall'Ecc in seguito all'occorrenza dell'evento *pieceAvailable*. L'algoritmo *MoveTo* ha bisogno della posizione *C* del prossimo slot disponibile all'interno del pallet.

Integrazione e test del sistema di controllo

Una volta definito il modello funzionale per mezzo dello standard Iec 61499, è possibile verificare i FB introdotti singolarmente, ad esempio secondo il metodo presentato in [6]. Seguendo tale metodo ogni FB può essere rappresentato tramite modelli Simulink/Stateflow. Le regole definite per rappresentare un modello Iec 61499 in ambiente Simulink/Stateflow sono descritte in [1]. Una volta verificati i FB che rappresentano la singola unità, possono essere verificati i FB che rappresentano i moduli di automazione di alto livello secondo l'approccio di tipo bottom-up presentato in [4]. Le operazioni descritte possono essere compiute prima dell'implementazione definitiva sul sistema fisico, migliorando l'affidabilità del software di controllo e riducendo significativamente tempi e costi totali di sviluppo [8].

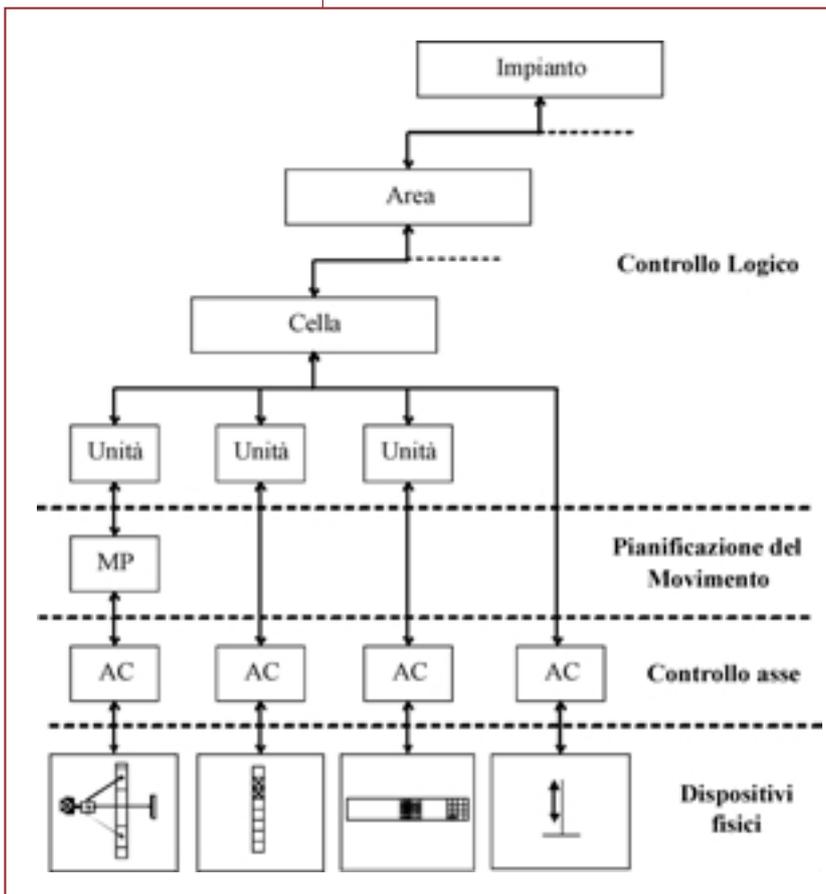


Figura 6 - Architettura del sistema di controllo

Progetto del sistema di controllo

Il sistema di automazione viene progettato seguendo i modelli di riferimento precedentemente introdotti. In particolare, l'architettura del sistema di controllo, definita secondo il modello presentato in precedenza, è riportata in Figura 6. Ogni componente della cella (nastro in ingresso, Pkm, nastro in usci-

Integrazione e test del sistema

Una volta validato il sistema di controllo tramite le sopracitate tecniche di simulazione, il software di controllo può essere generato automaticamente a partire dal modello Iec 61499, e può essere scaricato sul sistema target. A questo punto si può verificare che il sistema di controllo dell'impianto manifatturiero soddisfi pienamente la specifica di progetto.

Caratteristiche di riconfigurabilità del sistema di controllo

L'uso dei modelli di riferimento introdotti facilita una chiara documentazione ed una facile manutenzione del sistema di controllo. Inoltre, risultano notevolmente incrementate sia la possibilità di riutilizzo di una soluzione di automazione, sia l'integrazione di nuove funzionalità al suo interno, anche in presenza di modifiche sostanziali dei requisiti produttivi della cella. In relazione alle caratteristiche di riconfigurabilità e al progetto del sistema di controllo sopra descritti si può fare riferimento ai seguenti casi illustrativi.

Diagnosi dei guasti e relative strategie di recupero

Eventuali fallimenti delle operazioni di *Grasp* e *Release* possono essere gestiti tramite apposite strategie di recupero aggiungendo stati e transizioni all'Ecc del FB relativo alla Pkm (vedere, a proposito, gli stati 6 e 7 di Figura 8), senza modificare altro del sistema di controllo.

Modifica di una macchina

Se per garantire migliori o diverse capacità di manipolazione viene cambiato l'organo terminale della Pkm, come mostrato in Figura 9, allora il sistema di controllo può essere modificato solo nel sottomodulo cinematico all'inter-

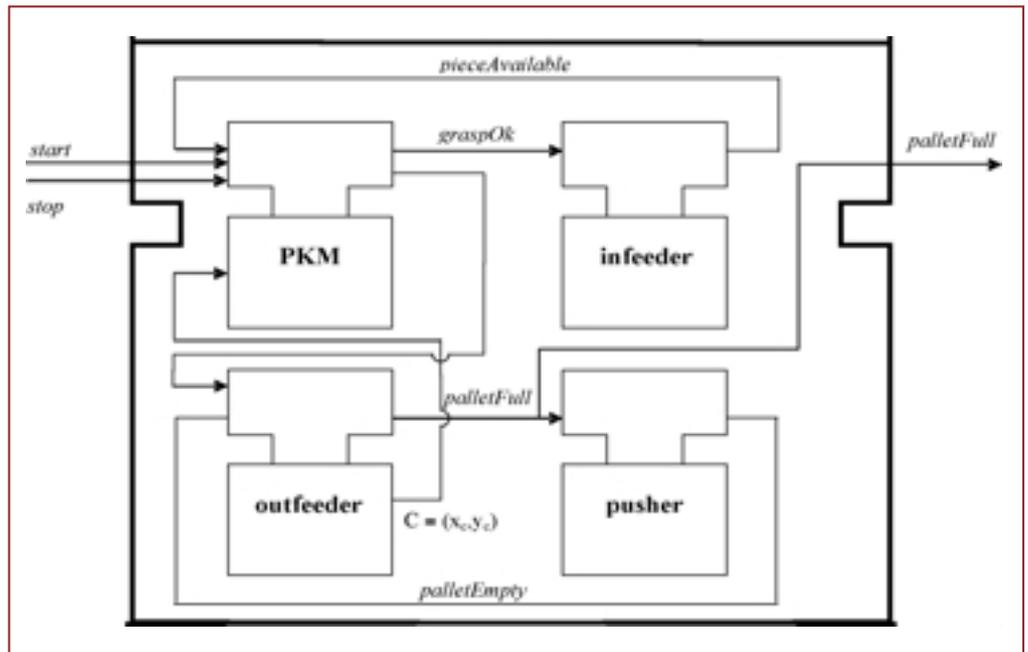


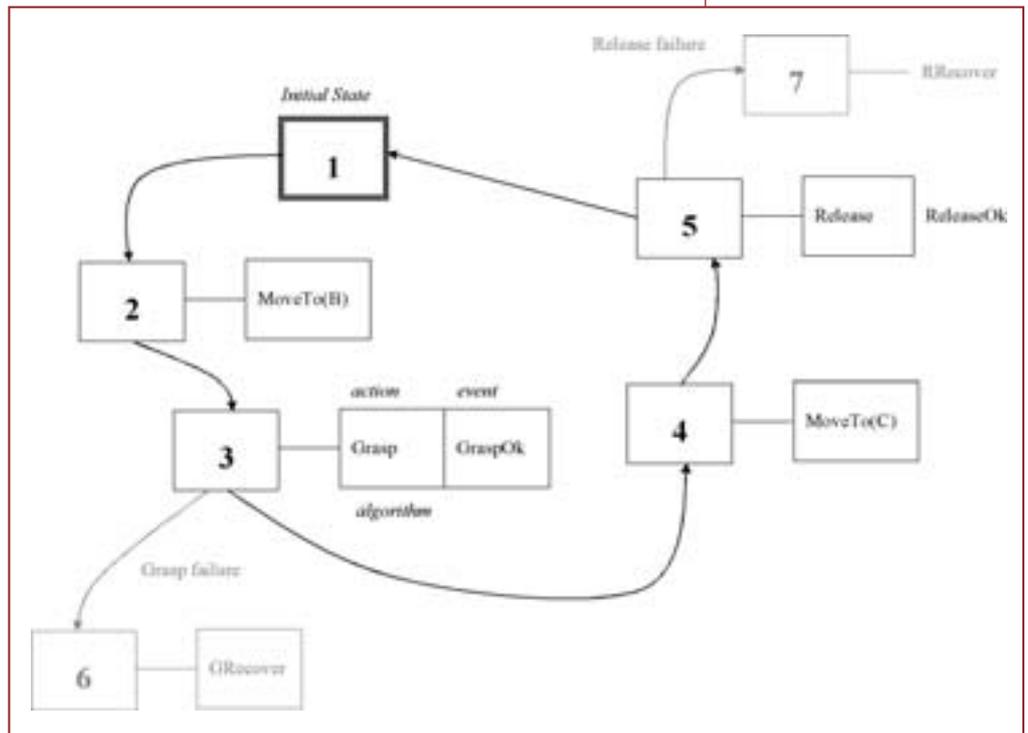
Figura 7 - Modello Iec 61499 del sistema di controllo della cella

no del modulo di pianificazione del movimento (Figura 3c), modificando i corrispondenti algoritmi all'interno del FB della Pkm.

Cambio di una macchina

Se dovesse essere utilizzato un robot seriale piuttosto di una Pkm, allora l'intero sistema di controllo potrebbe essere riutilizzato a patto di sostituire il FB della Pkm con l'equivalente FB relativo alle funzioni di controllo del robot seriale.

Figura 8 - Execution Control Chart del FB relativo alla Pkm



Introduzione di una macchina

Se devono essere aggiunte ulteriori stazioni di lavoro alla cella, come ad esempio la ruota di pulitura mostrata in Figura 9, allora il sistema di controllo può essere esteso semplicemente aggiungendo un apposito FB, insieme ai relativi segnali di ingresso ed uscita, nel modello funzionale.

Conclusioni e sviluppi futuri

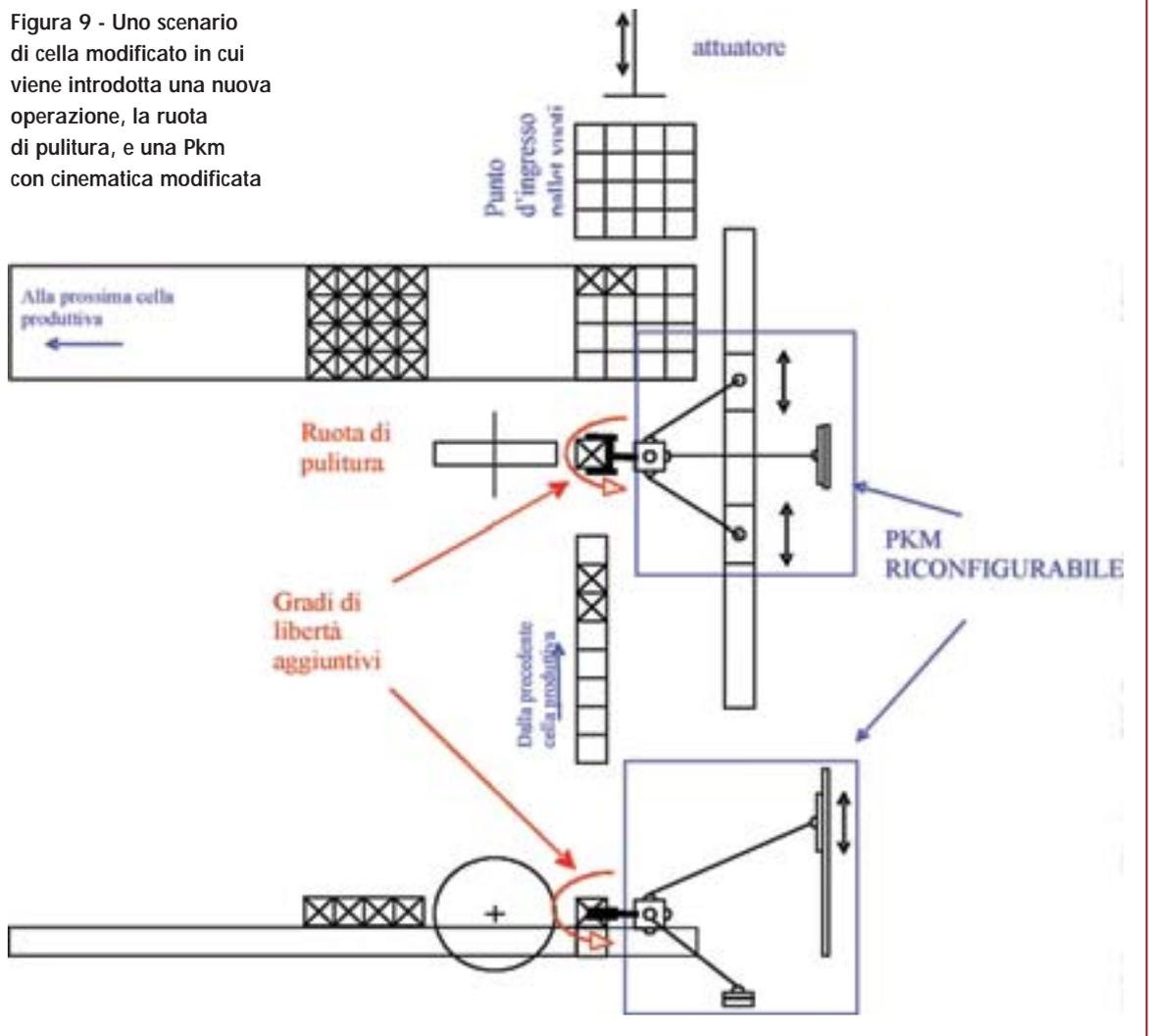
Nell'articolo sono state definite le caratteristiche principali di una metodologia di sviluppo per sistemi di controllo di impianti manifatturieri integrando modelli funzionali e architetturali con un metodo di progettazione strutturata. I benefici principali dell'approccio presentato sono la riduzione dei tempi e degli sforzi di sviluppo, unitamente all'affidabilità del sistema di controllo prodotto. In particolare, l'adozione di modelli formali ba-

sati sui concetti di modularità, gerarchia, aggregazione, incapsulamento ed ereditarietà, semplifica la descrizione del sistema di controllo e migliora notevolmente le possibilità di riutilizzo e di riconfigurazione. Gli sviluppi futuri del lavoro presentato riguarderanno: l'applicazione della metodologia proposta a diversi impianti manifatturieri, la definizione di metodi di analisi formale e di simulazione per i modelli di riferimento adottati; e lo sviluppo di strumenti Cacs (Computer Aided Control System Design) che supportino lo sviluppo del sistema di controllo attraverso l'intero ciclo di vita del progetto.

Bibliografia

[1] A. Ballarino A., E. Carpanzano, *Modular automation systems design using the Iec 61499 standard and the Simulink/Stateflow toolboxes*, Proceedings Asme Japan-Usa

Figura 9 - Uno scenario di cella modificato in cui viene introdotta una nuova operazione, la ruota di pulitura, e una Pkm con cinematica modificata



- Symposium on Flexible Automation, Jusfa 2002, Hiroshima, Japan, 14-19 July, 2002, pp. 465-472.
- [2] S. Birla, D. Faulkner, J. Michaloski, S. Sorenson, G. Weinert, J. Yen, *Reconfigurable Machine Controllers Using Omac Api*, 2001 Cirp, Ann Arbor, 2001.
- [3] E. Carpanzano, *A Development Methodology for Hybrid Control Systems*, PhD Thesis, Politecnico di Milano, 1999.
- [4] E. Carpanzano, A. Ballarino, *A structured approach to the design and simulation-based testing of factory automation systems*, Proceedings of the Ieee International Symposium on Industrial Electronics, Isie 2002, L'Aquila, July 8-11, 2002, pp. 181-186.
- [5] E. Carpanzano, D. Dallefrate, F. Jatta, *A Modular Framework for the Development of Self-reconfiguring Manufacturing Control Systems*, Proceedings of the Ieee International Conference on Intelligent Robots and Systems, Iros 2002, Lausanne, Switzerland, September 30-October 4, 2002.
- [6] E. Carpanzano, L. Ferrarini, C. Maffezzoni, *Modular Testing of Logic Control Functions with Matlab*, Proceedings of the 13th European Simulation Symposium and Exhibition, Marseilles, France, Oct. 18-20, Scs, 2001, pp. 206-210.
- [7] A. Elfving, U. Kirchhoff, *Design Methodology for Space Automation and Robotics Systems*, Esa Journal, vol. 15, pp. 149-164, 1991.
- [8] L. Ferrarini, E. Carpanzano, *A Structured Methodology for the Design and Implementation of Control and Supervision Systems for Robotic Applications*, Ieee Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, n. 2, 2002, pp. 272-279.
- [9] S. Fujita, M. Kanemoto, H. Asano, T. Inoue, A. Okano, H. Uno, N. Kakishita, A. Noda, Ose Consortium, *OSEC Position Paper*, Itia Series, 1998.
- [10] C. Maffezzoni, L. Ferrarini, E. Carpanzano, *Object-Oriented Models for Advanced Automation Engineering*, Control Engineering Practice, vol. 7, pp. 957-968, 1999.
- [11] S.P. Negri, *Analysis and Design of a reconfigurable machine for assembly operations*, Tenth International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, Raad 2001, Vienna, 2001.
- [12] Osaca Association, "Osaca handbook", 1997.
- [13] G. Pritschow, Y. Altintas, F. Jovane, Y. Koren, M. Mitsubishi, S. Takata, H. Van Brussel, M. Weck, K. Yamazaki, *Open Controller Architecture - Past, Present and Future*, Annals of the Cirp, vol. 50/2/2001.
- [14] R. Schoop e A. Strelzoff, "Asynchronous and Synchronous Approaches for Programming Distributed Control Systems Based on Standards", Control Engineering Practice, vol. 4, no. 6, pp. 855-861, 1996.
- [15] Standard Iec 61499, "Function Blocks for Industrial-Process Measurements and Control Systems", Iec Tc65/Wg6, 2001.
- [16] Ocean web page, http://www.fidia.it/english/research_ocean_fr.htm.