

## Sistema Flessibile per la Gestione di Catene di Produzione

P. Bellini\*, M. Buonopane\*, M. Montanelli#, P. Nesi\*

\* Dipartimento di sistemi e informatica, Università di Firenze, Italia

Tel. +39-055-4796523, Fax. +39-055-4796363, [nesi@ingfi1.ing.unifi.it](mailto:nesi@ingfi1.ing.unifi.it), [nesi@dsi.unifi.it](mailto:nesi@dsi.unifi.it)

# SED, Special Electronic Design, email: [c.bruni@sednet.com](mailto:c.bruni@sednet.com)

Project www site: <http://www.dsi.unifi.it/~hpcn/wwwmupaac/wwwpag.html>

### Abstract

*Nelle catene di produzione industriali sono presenti diverse fasi di elaborazione che richiedono movimento di assi in interpolazione. Queste attività devono essere sincronizzate con altre attività lungo la catena di produzione. I controlli numerici computerizzati (CNC) che sono alla base del sistema di controllo di tali catene devono essere flessibili, facilmente espandibili e riusabili; poiché le catene di produzione sono frequentemente riconfigurate per soddisfare nuove esigenze produttive con differenti requisiti tecnici. In questo articolo, viene presentata l'analisi di un'architettura sulla base della quale si possono costruire sistemi di controllo distribuito e flessibili per il controllo di catene di produzione. L'architettura è stata definita nell'ambito dei progetti ESPRIT HPCN (High Performance Computer Networking) della Comunità Europea, ed ha il nome di MUPAAC (Multi Processor Architecture for Automatic Control). L'architettura MUPAAC ha portato alla realizzazione di un prototipo che è stato testato nel campo della produzione dei passpartout.*

### 1. Introduzione

Allo stato attuale, la maggior parte delle macchine automatizzate usate nelle catene di produzione (per mescolare, tagliare, misurare, saldare, per elettroerosione, muovere pezzi, robot, nastri trasportatori, etc.) sono controllate da sistemi basati su microprocessori. Questi sono chiamati CNC (Computerized Numerical Controls) e forniscono un certo numero di assi interpolati e sensori/attuatori digitali [1]. I CNC sono tipicamente sistemi di tempo-reale [7], [8], e presentano tutti i relativi problemi di tempificazione. I CNC ricevono le istruzioni che descrivono il tipo di elaborazione da effettuare in termini di programmi ISO. Questi sono generati da stazioni CAD/CAM. Un programma ISO è composto da una serie di istruzioni elementari che comprendono fra l'altro istruzioni per definire i *macropunti* necessari all'interpolazione (oltre ad eventuali informazioni tecniche). Il sistema CNC, attraverso un interpolatore, calcola i *micropunti* che sono usati per generare il profilo richiesto fra due macropunti. Le operazioni di un CNC possono essere così riassunte:

- Interpretazione dei programmi ISO. Versioni specifiche di programmi ISO possono essere utilizzate per descrivere operazioni particolari di una macchina oppure operazioni su porte di I/O in termini di equazioni logiche;
- Esecuzione dei comandi di basso livello per muovere gli assi delle macchine e per altri servizi ausiliari attraverso porte digitali e analogiche (sensori).

Un CNC è in grado di (i) gestire errori o fallimenti che possono avvenire sulla macchina sotto controllo, e (ii) monitorare la produzione gestendo variabili di stato della macchina. Gli errori possono essere corretti attraverso specifiche istruzioni e/o re-inviati verso altri sistemi basati su microprocessore che controllano l'area automatizzata.

I CNC sono usati come componenti elementari per la costruzione di catene di produzione complesse. Queste possono essere viste come organizzate in tre livelli gerarchici.

Il primo livello è definito come FMM (Flexible Manufacturing Module) – che corrisponde all'isola di produzione. Il livello FMM è tipicamente coperto da una macchina singola dotata di robot ausiliari per caricare e scaricare pezzi. Quando sono sufficienti basse prestazioni, un FMM può essere composto da un

sistema basato su un singolo microprocessore che coordina le macchine e i servizi ausiliari (ed esempio, 3 assi in interpolazione per le macchine e 2-3 assi per ogni robot). Quando sono necessarie prestazioni più elevate, l'FMM deve essere gestito attraverso un sistema multiprocessore. *Questa soluzione aumenta notevolmente la complessità del sistema sia da un punto di vista hardware che software.* In questo caso, il processo di produzione di ogni FMM deve essere gestito attraverso una stazione di controllo centrale. In genere gli FMM di una catena di produzione hanno il loro controllore che comunica con il sistema centrale di controllo che coordina gli FMM attraverso una rete locale.

Questo secondo livello, detto FMS (Flexible Manufacturing System), è composto da più FMM connessi con un canale di comunicazione ad una stazione centrale che gestisce le varie celle di produzione e il processo di produzione in generale. Fra i più importanti produttori di CNC, SIEMENS propone una rete di comunicazione basata su IEEE 802.3. OMRON, ABB, Blue Chip propongono proprie reti di comunicazione per connettere solo moduli PLC. Intelligent Instrumentation propone una rete Ethernet per connettersi ai propri moduli su *bus di campo* come Profibus, Bitbus o CANbus. Queste connessioni sono di tipo Master-slave dove il Master gestisce la comunicazione, come un tipico controllore centralizzato non-distribuito.

Al terzo livello si ha il Factory General Supervisor (FGS). Il ruolo di un FGS è tipicamente coperto da una coppia di macchine: una per la gestione della parte amministrativa e l'altra per il controllo del processo di produzione.

Si noti che, la grande integrazione fra livelli, per differenti tipi di macchine è una frequente richiesta dei produttori di CNC. In realtà, questa integrazione è una mera illusione, poiché questo è nella maggiore parte possibile solo usando CNC omogenei. La maggior parte delle catene di produzione sono realizzate per una data produzione, e vengono distrutte quando la produzione è conclusa per creare una nuova catena.

Recentemente la complessità delle FMS sta crescendo a causa della necessità di un crescente numero di robot e servizi. Questa tendenza ha reso inadeguati molti sistemi FMM. L'aumento di complessità di controllo non può essere gestita usando controllori numerici decentralizzati perché la connessione via seriale o altro canale non è abbastanza veloce per coordinare gli assi. La comunicazione fra controllori FMM e altri CNC deve avvenire attraverso un canale di comunicazione ad alte prestazioni e non solo con un bus di campo che ha una banda limitata.

Questo tipo di soluzione, però ha lo svantaggio di diminuire la flessibilità. La flessibilità è una caratteristica molto importante, infatti, il numero di assi controllati e le loro prestazioni cambiano radicalmente da una macchina ad un'altra. La soluzione di fornire un controllore per asse o per tre assi è troppo costosa e poco flessibile per essere accettata in modo diffuso. Tipicamente i controllori a livello FMM non vengono adeguatamente sfruttati in base alle loro capacità.

Recentemente alcuni costruttori di CNC americani stanno iniziando a studiare una soluzione basata su sistemi multiprocessore (architettura parallela) per implementare architetture di controllo flessibile, per FMS. Questa soluzione riduce inoltre la complessità e il rapporto costo/prestazioni dei CNC e nel contempo aumenta la modularità del sistema.

Secondo questo nuovo approccio, *soluzioni basate solo sull'aumento delle prestazioni di un CNC non possono essere impiegate per controllare (con lo stesso CNC) più assi in una catena di produzione a basse prestazioni in quanto non sono flessibili. Le soluzioni che vedono CNC a basse prestazioni non possono essere utilizzate per controllare catene di produzione ad alte prestazioni. Sistemi che includono CNC a basse ed alte prestazioni non possono essere realizzati a costi ragionevoli in quanto la ristrutturazione frequente delle catene di produzione provocano l'inserimento di nuove macchine che non possono essere facilmente integrate con le precedenti utilizzando i CNC a disposizione.*

Inoltre, questi sistemi presentano diverse variabili che influenzano le prestazioni, in relazione alla configurazione scelta. Così, la valutazione di questi sistemi critici deve essere effettuata attentamente. Un approccio può essere quello di cercare una configurazione che permette di avere le prestazioni richieste con un basso prezzo. Una valutazione dettagliata permettere di identificare la corretta configurazione e le

prestazioni finali.

**In questo articolo**, viene presentata l'architettura MUPAAC (Multi Processor Architecture for Automatic Control). Il progetto MUPAAC HPCN ESPRIT IV è stato sviluppato per risolvere i problemi sopra esposti [2], [3]. Il progetto utilizza la tecnologia HPCN, per definire l'architettura parallela e distribuita del MUPAAC. Questa soluzione è stata identificata studiando ed implementando un insieme di componenti flessibili che possono essere riutilizzati in varie combinazioni per realizzare sistemi di controllo per alte o basse prestazioni.

L'architettura MUPAAC presenta tre livelli. L'FGS controlla l'intera catena di produzione attraverso una serie di computer industriali (SIPC, Specialised Industrial Personal Computer) connessi al FGS attraverso una rete locale. Ogni SIPC può controllare una a più macchine attraverso una serie di schede specifiche basate su DSP. Queste schede a DSP e i SIPC controllano, attraverso il CANbus, gli ingressi e le uscite digitali, i sensori e gli attuatori della catena di produzione. Questi elementi permettono la costruzione di un largo insieme di configurazioni.

I partner del progetto MUPAAC sono stati: SED Srl; Univeristà di Firenze con il Dipartimento di Sistemi e Informatica e il Dipartimento di Ingegneria Elettronica; VALIANI Spa. (come utente finale); e CESVIT (High-Tech Agency) come nodo TETRApc-TTN HPCN (Technology Transfer Node). Il prototipo realizzato è stato testato e validato da VALIANI nel campo della produzione di macchine per la produzione di passpartout.

## 2. Architettura Generale

L'architettura MUPAAC presenta un ulteriore livello rispetto alle proposte dei costruttori di CNC discusse in precedenza. Un computer generale, (MUPAAC Supervisor), controlla l'intera catena di produzione attraverso un insieme di SIPC connessi mediante una rete locale (si veda Fig.1). Ogni SIPC gestisce una o più macchine (per mescolare, tagliare, misurare, saldare, muovere pezzi, robot, nastri etc.) attraverso un insieme di schede basate su DSP. Queste schede e i SIPC operano su gli ingressi e le uscite digitali, i sensori e gli attuatori della catena di produzione connessi per mezzo di un sottosistema CANbus. Si consente in questo modo un'elevata flessibilità permettendo la costruzione di un controllo distribuito usando una moltitudine di possibili configurazioni: da un unico controllore fino a 256 computer industriali ognuno dei quali può controllare fino a 4 macchine industriali con 4 assi (16 assi per SIPC, così da arrivare a 4000 assi). Il controllo distribuito può essere riconfigurato per soddisfare successivi cambi di configurazione nella catena di produzione con sforzo veramente minimo.

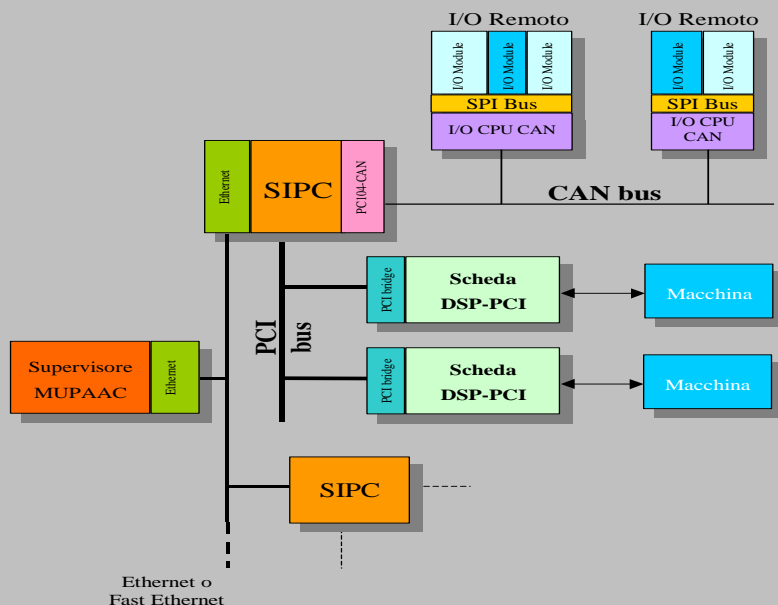


Fig. 1 - Architettura hardware di MUPAAC

Con MUPAAC, la flessibilità è stata raggiunta attraverso:

- (i) la struttura hardware e software delle schede basate su DSP, che permettono di gestire da 1 a 4 assi per scheda;
- (ii) la gestione degli ingressi e delle uscite (sia analogiche che digitali) per mezzo di computer industriali (i controllori FMM) e schede DSP;
- (iii) la riconfigurabilità del software per la gestione degli assi e delle porte di input/output;
- (iv) l'utilizzo di una connessione veloce fra i controllori FMM e le schede DSP (attraverso PCI) e fra il FGS e gli FMM attraverso una rete Ethernet o Fast Ethernet;
- (v) soluzioni Plug and play per i componenti su PCI e CANbus.

L'intero sistema di controllo distribuito può essere riconfigurato per soddisfare i cambiamenti della catena di produzione, riutilizzando le stesse schede per raggiungere ogni tipo di prestazione richiesta.

I componenti principali dell'architettura hardware di MUPAAC sono:

**Supervisore MUPAAC:** è la stazione di controllo generale. L'utente da questa postazione si interfaccia all'intero sistema. La stazione presenta, inoltre, una connessione con area CAD/CAM. Il Supervisore MUPAAC invia/riceve messaggi per/da i vari microprocessori del sistema per controllare le macchine attraverso i SIPC.

**Le schede SIPC (Special Industrial Peripheral Computer):** sono sistemi basati su microprocessore che eseguono le istruzioni ISO provenienti dal Supervisore MUPAAC. I SIPC interagiscono inoltre con (i) le schede DSP-PCI per controllare gli assi e ricevere allarmi e sincronizzazioni; (ii) le schede di I/O Remoto per attivare e ricevere segnali di I/O attraverso il CANbus. Le schede su CANbus sono connesse al SIPC con un'interfaccia PC104 (bus ISA industriale) mentre le schede di rete possono essere connesse sia su un bus PCI che ISA.

**Le schede DSP-PCI** sono basate su DSP Analog Device AD2106x (SHARC), per gestire fino a 4 assi. A livello fisico, la comunicazione fra SIPC e le varie schede DSP-PCI avviene attraverso il bus PCI. Le schede supportano meccanismi di configurazione *plug and play*, così che possono essere inserite direttamente senza nessuna configurazione software o manuale (DIP-Switches, etc.) per evitare conflitti (linee di interruzione, zone di memoria).

**Le schede di I/O remoto** permettono di leggere/scrivere le porte di I/O. Queste includono un microprocessore per interpretare i messaggi inviati sul CANbus. I messaggi rappresentano comandi per gestire le porte di I/O e per gestire i meccanismi di Plug and Play. Sul CANbus possono essere inseriti fino a 64 schede di I/O remoto. Ogni scheda di I/O remoto può essere connessa con 8 moduli di I/O attraverso una specifica interfaccia su bus SPI. Un SIPC può controllare fino a 512 moduli di I/O. Sono possibili diversi tipi di moduli di I/O, per input digitali, output digitali, output con relays, contatori, encoder, input analogici e controllo monoassi per basse prestazioni. Queste schede supportano un tipo di meccanismo di configurazione *plug and play*, poiché i moduli di I/O realizzati hanno attributi speciali che permettono di conoscere il tipo di modulo.

### 3. Architettura software

In Fig.2 è mostrata l'architettura software del sistema MUPAAC dove i diversi componenti sono distribuiti sui vari elementi hardware in relazione all'architettura generale.

#### 3.1 Software Supervisore

Il software permette all'utente di (i) inviare programmi ISO o singoli comandi ISO ad ogni specifico SIPC, e (ii) vedere errori/allarmi inviati dal SIPC. Il *Modulo Client di Comunicazione* implementa la parte client di un protocollo di comunicazione personalizzato basato su TCP/IP. Questo protocollo permette di inviare programmi ISO e comandi al SIPC. Permette inoltre, di ricevere errori, allarmi, ed indicazioni di fine

elaborazione in tempo quasi reale. Questa parte è stata implementata sotto WindowsNT.

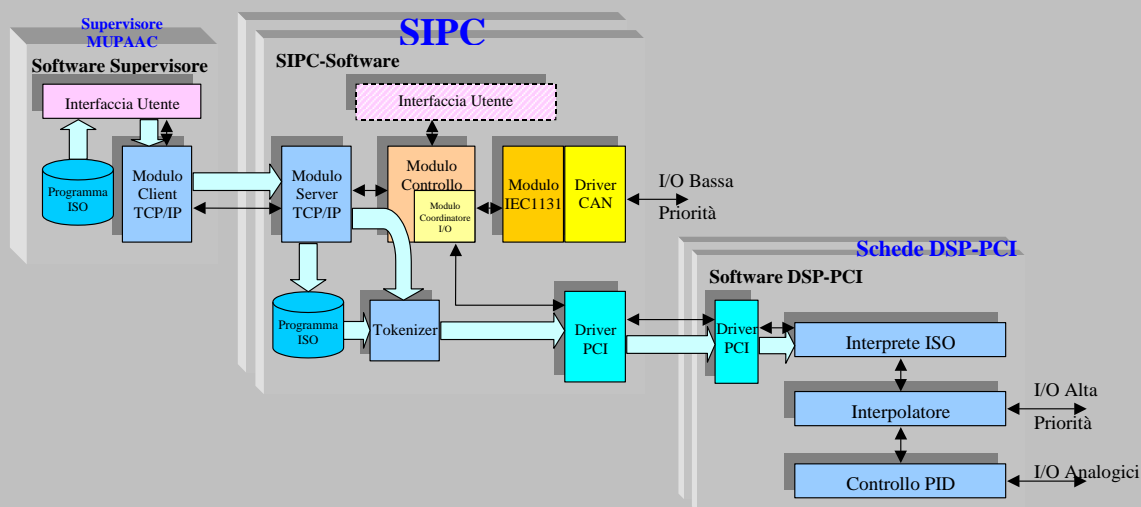


Fig. 2 - Architettura software di MUPAAC

### 3.2 Software SIPC e protocollo SIPC-PCI

Il SIPC ha come sistema operativo il sistema Microsoft WindowsCE 2.1. Questo sistema nasce proprio per ambienti embedded in quanto è pensato per essere personalizzabile e “ROMable”, e presenta inoltre il supporto per il TCP/IP. WindowsCE è un sistema operativo multitasking preemptive adatto per applicazioni soft real-time. Prima di utilizzare questo nuovo sistema operativo, è stata effettuata un’analisi delle prestazioni e dell’affidabilità del sistema attraverso metodologie e metodi di misura proposti in [4], [5], [6]. In Fig. 3 viene mostrato l’overhead e la varianza dell’overhead introdotta dallo scheduler durante la gestione dei thread di uno stesso processo. Nella stessa figura WindowsCE è stato confrontato con WindowsNT 4.0. L’overhead di WindowsNT è più basso di quello di WindowsCE, ma la varianza, e quindi la predicibilità dello scheduler è migliore per WindowsCE rispetto a WindowsNT. Questo è dovuto ai diversi task non controllabili che sono tipicamente eseguiti su Windows NT a livello di kernel. In [4], Windows NT è stato confrontato con LINUX, OS/2 e Win95.

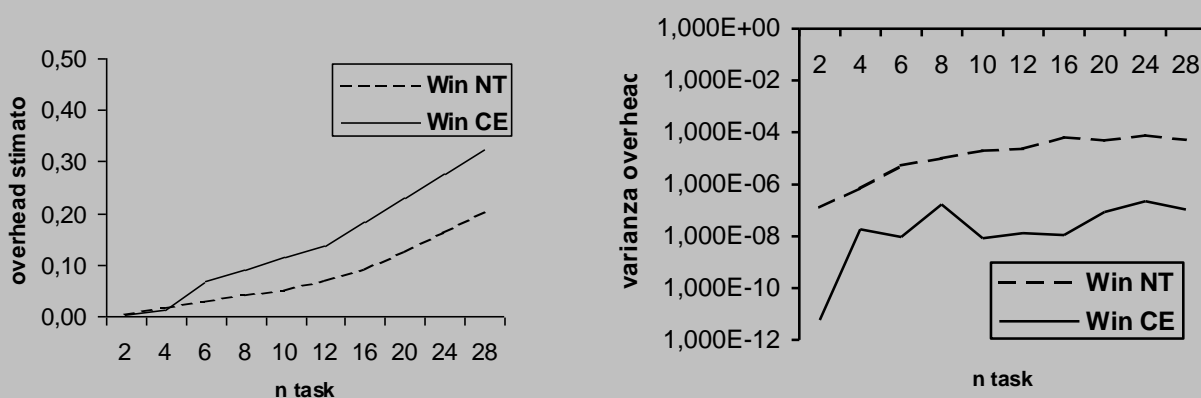


Fig. 3 - Stima e varianza dell’Overhead di Windows CE e Windows NT

L'Interfaccia utente per il SIPC è opzionale, poiché le operazioni sono fatte via remota attraverso il PC Supervisore. I componenti software del SIPC sono utilizzati per:

1. Comunicare con il PC Supervisore per ricevere i programmi ISO da eseguire;
2. Notificare errori ed allarmi al PC Supervisore;
3. Coordinare la gestione dei moduli di I/O.

Il *Modulo di Comunicazione Server* implementa il protocollo di comunicazione usato per ricevere i Programmi/Comandi ISO.

Prima di inviare il Comando/Entità ISO alla scheda DSP-PCI, questo viene analizzato. Il comando ISO viene inviato alla scheda DSP-PCI per mezzo del bus PCI usando uno specifico protocollo SIPC-DSP. La comunicazione con il DSP si basa su un meccanismo ad interruzione che permette di raggiungere alte prestazioni lasciando il SIPC e il DSP liberi di lavorare su altre attività di calcolo. Un altro importante compito di questo modulo è inviare errori ed allarmi ricevuti dalle schede DSP, dai moduli di I/O remoti o generati dal SIPC stesso, al PC Supervisore.

Il terzo compito del SIPC è coordinare le schede DSP con i moduli di I/O remoti connessi attraverso il CANbus (*Modulo Coordinamento I/O*). Questo modulo aggiorna con regolarità (10ms) il valore delle uscite e prendere il valore degli ingressi; utilizza il *Driver CAN* per accedere ai moduli di I/O. Il modulo è stato realizzato come uno specifico driver sotto WindowsCE per la scheda PC104-CAN. I valori delle uscite possono essere scritti dalla scheda DSP (aggiornando la regione di memoria di Stato) attraverso un risolutore di equazioni (*Modulo IEC1131*). Il risolutore di equazioni logiche prende i valori degli ingressi, i valori dei flag, le quote reali e ideali degli assi (utilizzando il *Driver PCI* per accedere alla regione di stato della scheda DSP-PCI) e produce il valore di uscita che deve essere scritto sul modulo di uscita del nodo CAN in base alla particolare condizione logica.

### 3.3 Protocollo CANBUS e Software delle schede di I/O remoto

Il Controller Area Network (CAN) è un protocollo di comunicazione seriale che supporta in maniera efficiente il controllo real-time distribuito con un alto livello di sicurezza. Viene utilizzato per reti ad alte prestazioni e a bassi costi. Nell'industria automobilistica, vari dispositivi come: le unità di controllo dei motori, sensori, etc., sono connessi utilizzando il CANbus con bit-rates fino a 1Mbit/s.

Un nodo CANbus è strutturato per livelli:

<b>Livello Applicativo</b>
<b>Livello Object</b>
<b>Livello Trasferimento</b>
<b>Livello Fisico</b>

Lo scopo del *Livello Fisico* è di trasferire i bit tra differenti nodi, secondo le specifiche caratteristiche elettriche. All'interno di una rete, il livello fisico deve essere uguale per tutti i nodi. Il *Livello Object* e il *Livello Trasferimento* contengono tutti i servizi e le funzioni definite nel livello data link dal modello ISO/OSI. Il *Livello Applicativo* è utilizzato per stabilire la comunicazione tra le applicazioni. Questo livello non è stato standardizzato ed esistono sul mercato vari protocolli (SDS, CanOpen, DeviceNet).

Per il progetto MUPAAC, il chip Intel 82527 è stato scelto per realizzare all'interno del modulo CANbus il livello *Fisico*, *Trasferimento* e *Object*. Per il *Livello Applicativo* è stato utilizzato un sottoinsieme del protocollo SDS, chiamato MUPAAC-SDS.

Il modello di comunicazione supportato dal MUPAAC-SDS è di tipo Master/Slaves, dove il dispositivo Master (il SIPC) usa i servizi di I/O forniti dal dispositivo Slave (il modulo di I/O remoto). Il Master vede ogni dispositivo Slave come un oggetto con:

- Un insieme di attributi che possono essere letti o scritti;
- Un insieme di azioni che possono essere effettuate.

Il Master del protocollo MUPAAC-SDS è stato implementato direttamente attraverso un *Driver CAN* per WindowsCE. Questo driver esporta alle applicazioni le funzioni necessarie per Leggere/Scrivere un attributo e per eseguire un azione su di una porta di I/O remota.

Nel caso di configurazioni complesse, una parte del carico di lavoro del *Modulo IEC1131* presente sul SIPC può essere trasferito sulla scheda CAN di interfaccia con CPU SH7000. In questo modo, la CPU può essere programmata per risolvere autonomamente alcuni vincoli fra i suoi moduli di ingresso e di uscita.

### 3.4 Software DSP-PCI

Il software sul DSP si occupa di ricevere i comandi ISO dal bus PCI (attraverso il *Driver PCI*) e di gestire l'esecuzione di tali comandi (vedi Fig. 2).

Il software sul DSP gestisce due tipi di interpolazione: lineare e circolare.

Se il comando ricevuto indica il movimento di un asse, questo viene prima processato per calcolare alcuni dati importanti per l'interpolazione. Ad esempio: la lunghezza della traiettoria da realizzare, il test di continuità fra due movimenti, il calcolo della velocità del movimento, le coordinate del centro del cerchio (solo per l'interpolazione circolare), etc.

Nel caso di un comando non di movimento, questo viene controllato per verificare se deve essere eseguito immediatamente o se deve essere eseguito in un tempo successivo, dopo che l'asse si è fermato. Nel primo caso, il comando è eseguito immediatamente, nel secondo caso si attende la fine del movimento dell'asse e poi la richiesta di comando viene processata. Esempio di un comando eseguito dopo lo stop dell'asse, è il cambio dei parametri del algoritmo di controllo. Come esempio di comando che deve essere eseguito prima che l'asse si fermi, si consideri il comando di break di un asse a causa di una emergenza. Il software presente sulla scheda DSP-PCI controlla inoltre, le uscite analogiche della scheda connesse ai motori. Sulla scheda DSP-PCI, alcuni ingressi e alcune uscite per la loro importanza, devono essere direttamente controllate dal software dell'interpolatore. Queste porte abilitano i motori, controllano gli interruttori di fine corsa, le tacche di zero degli encoder. Questi segnali di I/O, più il Servo Error (errore di traiettoria massima permessa dal sistema) sono controllati ogni servo cycle prima della generazione dei micropunti.

L'interpolatore deve inoltre conoscere altri valori di input provenienti dal CANbus. Per fare ciò, il software DSP accede alla regione di stato per ottenere l'ultimo valore assunto dall'input che l'interpolatore vuole conoscere.

Nella fase di interpolazione, i micropunti generati indicano la traiettoria che la macchina deve effettuare per ottenere il profilo del pezzo in lavorazione.

L'algoritmo usato in questa elaborazione influenza la qualità dell'intero sistema, in questa fase, occorre usare un algoritmo che garantisce la massima precisione e che sia più veloce possibile; la velocità dell'elaborazione, infatti determina la precisione dell'elaborazione.

Il software realizzato per questa scheda utilizza l'algoritmo EXACT DDA per l'interpolazione lineare, mentre per l'interpolazione circolare utilizza un'interpolazione con seno/coseno, poiché garantisce maggior precisione rispetto all'algoritmo DDA. In alcuni casi, possono essere usati algoritmi di interpolazione più sofisticati come Nurbs, Splines.

## 4. Sistema di valutazione per l'analisi delle prestazioni

I CNC possono essere classificati sulla base del tempo di refresh (periodo) per valutare/generare le azioni su di un asse, RefAx (servo cycle time). Per bassi valori di RefAx si hanno alte prestazioni ed alti costi, perché un breve periodo di refresh riduce l'errore (nel tagliare, saldare, etc., in generale per l'inseguimento del profilo dato) ed esegue l'elaborazione in breve tempo.

- **Alte prestazioni (RefAx < 1ms):**  
PMAC (USA), GALIL (Israele), Allen Bradley (USA), Siemens (Germania), NUM (Francia), etc.
- **Medie prestazioni (1 ms < RefAx < 7 ms):**  
Fagor (Spagna), Siemens (Germania), etc.
- **Basse prestazioni (RefAx > 7 ms):**

SIPRO (Italia), SED con architettura INDEX-DSP (Italia), ECS (Italia), Siemens (Germania), etc.

Si noti che alcuni costruttori di CNC presentano diverse soluzioni capaci di coprire differenti settori di mercato, come ad es. la Siemens, la ECS, etc. Attualmente i controllori che sono impiegati per tagliare, saldare, per il movimento, appartengono alla classe MEDIA, ALTA. L'utilizzo di una soluzione ad alte prestazioni incrementa la precisione dell'elaborazione.



**Fig. 4 - Una macchina di VALIANI con MUPAAC**

Con lo scopo di mostrare i principali risultati raggiunti con il prototipo MUPAAC, sono stati considerati alcuni parametri rilevanti per la valutazione del sistema di controllo. Questi parametri sono:

- Tempo di refresh (servo cycle axis) (RefAx indicato nell'introduzione).
- Numero di Entità Processate al Secondo (NEPS) passate dalla scheda SIPC al DSP.
- Tempo per l'aggiornamento dell'I/O via CANbus.
- Flessibilità di installazione e riuso.

Il primo dei quattro fattori è usato per misurare la bontà di un sistema di controllo per catene di produzione in termini di precisione della lavorazione. Questo parametro viene considerato dai costruttori di catene di produzione per identificare la soluzione più adatta alle proprie necessità.

L'ultimo aspetto da considerare è la flessibilità. Questa può essere misurata sulla base della capacità di alcuni componenti (come i controllori numerici) di essere utilizzati con diverse categorie di prestazioni. Nel progetto MUPAAC, è stata data un'attenzione particolare alla realizzazione di un sistema flessibile e riutilizzabile.

Vediamo in particolare i risultati ottenuti per il progetto MUPAAC per questi parametri.

- **Servo loop cycle.** Il valore ottenuto per il servo loop cycle è 53  $\mu$ sec per l'interpolazione circolare con due assi, e aumenta a 83  $\mu$ sec aggiungendo due assi in interpolazione lineare. La valutazione è stata realizzata considerando un classico algoritmo PID per il controllo del motore. Il servo loop time per un solo asse in interpolazione lineare è di 32  $\mu$ sec. Questi valori sono migliori di quelli previsti nella fase di progetto (100  $\mu$ sec).
- **Numero di Entità Processate al Secondo.** La misura del Numero di Entità Processate al Secondo, NEPS, mostra la capacità del sistema di processare entità geometriche. Le entità corrispondono ad istruzioni elementari ISO che fanno parte del programma che il controllore numerico esegue per produrre i pezzi. *Allo scopo di realizzare una valutazione della misura del NEPS processate dal sistema è stata definita una specifica architettura di prova: un MUPAAC Supervisore connesso attraverso la rete Ethernet ad un SIPC che controlla due schede DSP-PCI. Ogni scheda DSP-PCI controlla una macchina*



per la produzione di passpartouts (tre assi: due in interpolazione e un asse lineare per l'orientazione). Anche se questa configurazione è semplice, è tuttavia sufficiente per valutare tutti i dettagli del costo di esecuzione. Il risultato ottenuto è stato NEPS = 2556. Questo è un buon risultato poiché era stato previsto di ottenere un valore di NEPS = 1200.

- **Tempo per l'aggiornamento dell'I/O via CANbus.** E' stato ottenuto 600  $\mu$ sec per leggere/scrivere da/su porte digitali ad 8 bit. Questo significa che può essere raggiunto un valore di 13333 bps, in accordo con il throughput del CANbus che è 1 Mbps. Un test simile è stato realizzato anche per la comunicazione secondo la modalità fragmented. In questo caso, il trasferimento dei dati su 4 porte (24 bit) impiega 1200  $\mu$ sec. Con questo tipo di servizio si raggiunge un throughput di 20000 bps.
- **Flessibilità del sistema** La flessibilità del sistema MUPAAC è raggiunta grazie a tre caratteristiche principali. I componenti del CANbus sono Plug and Play, ogni modulo di I/O ha il proprio codice identificativo che può essere riconosciuto sia dalle periferiche CANbus basate su 8051 che su SH7000. Le schede DSP-PCI sono Plug and Play così, la loro presenza viene determinata dal SIPC che ritorna queste informazioni al MUPAAC Supervisore. Le schede DSP-PCI gestiscono da 1 a 4 assi. Nella tabella seguente sono riportate alcune configurazioni che può assumere il sistema, l'indice di costo è stato stimato considerando doppio il costo di un SIPC rispetto ad una scheda DSP.

N. SIPC	N. DSP per SIPC (max 4)	N. Assi per DSP (max 4)	N. Dsp Totali	N. Assi Totali	Indice di costo
1	1	4	1	4	3
1	2	2	2	4	4
1	2	4	2	8	4
1	4	2	4	8	6
1	4	4	4	16	6
2	4	2	8	16	12
2	4	4	8	32	12
4	4	2	16	32	24
4	4	4	16	64	24
8	4	2	32	64	48
8	4	4	32	128	48
16	4	4	64	256	96
64	4	4	256	1024	384

## 5. Conclusioni

L'architettura MUPAAC è stata studiata per soddisfare le necessità dei costruttori di catene di produzione. Il controllo numerico per tali sistemi deve essere flessibile, espandibile e riutilizzabile poiché le catene di produzione sono di frequente riconfigurate per adattarsi a nuove topologie e a diverse prestazioni.

L'architettura MUPAAC è basata su un insieme di Computer Industriali, SIPC, connessi attraverso una rete locale. Ogni SIPC controlla uno o più macchine automatiche attraverso delle particolari schede basate su DSP. Le porte di ingresso e di uscita sono invece gestite attraverso una rete CANbus.

La flessibilità raggiunta permette ai costruttori di controllori distribuiti di utilizzare un'ampia varietà di configurazioni. Da un singolo controllore, fino a complesse catene con 4000 assi. Durante la valutazione finale su una catena per la produzione di passpartout è stato rilevato da VALIANI un elevato decremento dei costi di riconfigurazione.

Le misure effettuate permettono di determinare la configurazione più adatta per massimizzare la precisione e diminuire i costi. La configurabilità flessibile e personalizzabile è possibile anche con alcune parti del sistema, aumentando l'addattabilità del CNC anche con CNC dalle basse prestazioni.

L'esperienza acquisita può essere di grande aiuto per altri costruttori di controllori, perché descrive alcune interessanti metriche e il processo con il quale sono state ottenute le misure.

I risultati di queste stime sono stati utilizzati dalla SED per incrementare le prestazioni dell'architettura attraverso l'aumento del numero di entità passate dal SIPC alla scheda DSP. Le prestazioni raggiunte con questa versione finale di MUPAAC CNC sono state migliorate del 30%.

## 6. Bibliografia

- [1] F. Butera, P. Nesi, M. Perfetti, "Reengineering a Computerized Numerical Control Towards Object-Oriented", *2<sup>nd</sup> Euromicro Conf. on Software Maintenance and Reeng.*, Marzo, 1998.
- [2] C. Bruni, P. Nesi, P. Tortoli, P. Bellini e F. Guidi, "Analysis of CANBUS and PCI-based Subsystems", MUPAAC ESPRIT IV HPCN, Deliv 3.1, Gennaio 1998.
- [3] P. Nesi, P. Tortoli e F. Guidi, "General software with measures and examples", MUPAAC ESPRIT IV HPCN, Deliverable 4.2, Agosto 1998.
- [4] G.Bucci, P.Nesi, "Overhead Estimation and Comparison for Multitasking Operating Systems for Personal Computers", *2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Parallel and Distributed Computing and Network*, PDCN'98, Australia, 1998.
- [5] J.B.Chen, Y.Endo, K.Chan, D.Mazieres, A.Dias, M.Seltzer, and M.D.Smith, "The Measured Performances of Personal Computer Operating Systems", *ACM Trans. on Comp. Sys.*, Vol14, Febbraio 1996.
- [6] L.McVoy, "lmbench: Portable Tools for Performance Analysis", in *Proc. of 1994 USENIX Tech. Conf.*, USA, Gennaio 1994.
- [7] G.Bucci, M.Campanai, e P.Nesi, "Tools for Specifying Real-Time Systems", *Journal of Real-Time Systems*, Vol.8, pp.117-172, Marzo 1995.
- [8] G.Bucci, M.Campanai, P.Nesi, e M.Traversi, "An Object-Oriented Dual Language for Specifying Reactive Systems", in *Proc. of IEEE International Conference on Requirements Engineering*, ICRE'94, USA, 18-22 Aprile 1994.