Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
122° (2004), Vol. XXVIII, pp. 7-13

MARIAGIOVANNA SAMI *

La nuova rivoluzione digitale: i sistemi *embedded* **

Innanzitutto, desidero ringraziare il Presidente e tutti gli Accademici per l'onore che mi hanno fatto. L'argomento che tratterò si riferisce all'area di cui mi occupo attualmente per quanto riguarda la mia attività di ricerca e anche (almeno in parte) per quanto riguarda la didattica: quella dei sistemi di elaborazione dell'informazione che non compaiono esplicitamente come «calcolatori» ma che svolgono funzioni specifiche in ambiti diversi e che spesso risultano trasparenti all'utente finale. Oggi, sistemi basati su microprocessori e dispositivi elettronici di complessità anche molto rilevante si trovano inseriti nelle più diverse realtà e intervengono, anche radicalmente, nella nostra vita quotidiana. Si tratta dei cosiddetti «sistemi embedded» – incapsulati, appunto, in macchine, dispositivi, sistemi che spesso nulla hanno di elettronico e di cui diventano la componente «intelligente». Penso che possa valer la pena di vedere insieme come, nell'arco di quarant'anni circa, si sia giunti a questa che può ben essere considerata la «seconda rivoluzione digitale» – meno immediatamente visibile di quella che ha portato un «personal computer» sulla scrivania di ognuno di noi, ma con influenze e ramificazioni ancor più profonde.

Nei primi dieci anni dall'introduzione dei primi calcolatori elettronici gli utenti dei sistemi di elaborazione non li affrontavano quasi mai direttamente: si rivolgevano al «centro di calcolo», un ambiente fortemente protetto, gestito da tecnici specializzati, e il problema che poi sarebbe stato definito come «interazione uomo-macchina» sostanzialmente non si poneva, perché i tecnici erano i depositari delle oscure istruzioni necessarie per far funzionare il calcolatore, e l'utente finale

* Socio dell'Accademia. Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione. Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano. E-mail: sami@elet.polimi.it

** Prolusione per l'inaugurazione del 222° Anno Accademico, Roma 29 aprile 2004, «Sala Igea», Palazzo Mattei, Piazza dell'Enciclopedia Italiana 4, Roma.

aveva solo il compito di tradurre i propri problemi e – più in genere – l'informazione da elaborare *nella forma richiesta dalla macchina* per poi *interpretare i risultati forniti*. Un primo passo verso una più semplice interazione fu costituito dalla definizione di linguaggi di programmazione più facilmente interpretabili che non il linguaggio di macchina e dalla realizzazione di «dispositivi di interfaccia» capaci di presentare i risultati in un formato più prossimo a quello abitualmente usato dagli utenti: ad esempio, passare dalla stampante al «plotter» consentì di affrontare realisticamente problemi i cui risultati finali dovevano avere forma grafica. Il calcolatore restava però uno strumento costoso e delicato, che *imponeva all'utente regole e vincoli*, talché l'utente doveva ricorrere all'intermediazione di un esperto.

La prima rivoluzione digitale è stata quella del passaggio dal centro di calcolo al calcolatore personale, sia esso «desktop» o «laptop» o «notebook». Il costo è diminuito di diversi ordini di grandezza (e altrettanto è aumentata la potenza di calcolo), linguaggi e tecniche di interazione hanno reso l'uso semplice anche per i non «addetti ai lavori», agli ingombranti lettori di schede si sono sostituite unità di ingresso di ogni genere (anche una penna su uno schermo…): tutto questo ha permesso di passare dalle poche centinaia di calcolatori dei primi anni Sessanta ai miliardi di unità cui si tende oggi. In termini di principio, però, la relazione uomo-macchina non cambia: l'uomo predispone le attività nella forma adatta perché siano eseguite dal calcolatore e il rapporto fra problema e risultato richiede sempre la mediazione dell'uomo.

L'inizio di un nuovo approccio risale alla prima metà degli anni '60, quando nasce una nuova azienda – la Digital Equipment Corporation – che presenta il primo *minicomputer*. Si tratta di un oggetto il cui costo si aggira intorno alle decine di migliaia di dollari (spropositato rispetto a oggi, ma ricordiamo che alla stessa epoca un *mainframe* costava qualche milione di dollari!), dotato di una potenza di calcolo molto modesta, praticamente privo di software di base. Una prima novità era data dalla robustezza del minicomputer - l'ambiente d'uso non richiedeva più particolari attenzioni, non occorreva un centro di calcolo condizionato e protetto, né si prevedevano i classici interventi di manutenzione periodica con relativo fermo macchina. L'aspetto rivoluzionario, però, era nel fatto che il *minicomputer* era predisposto per *reagire a eventi esterni generati dall'ambiente in cui veniva inserito, rispondendo entro termini di tempo noti*. L'evento era semplicemente rappresentato da un segnale elettrico generato dai sistemi che «interagivano» col minicomputer tramite opportune interfacce, qualunque fosse la loro natura intrinseca. Era quindi possibile (grazie a tutte le caratteristiche citate) che il minicomputer diventasse parte integrante di un sistema complesso, a priori di qualsiasi natura a patto che fosse possibile trasformare in segnali elettrici le informazioni che tale sistema produceva o richiedeva. Era il calcolatore che doveva ora «*adattarsi*» (grazie alle interfacce hardware e ai programmi software) al *sistema di natura diversa in cui era inserito e di cui diventava un componente*.

Minicomputer vennero ben presto adottati per coordinare e gestire strumenta-

zione complessa di laboratorio; forse vale la pena di ricordare che un'azienda produttrice di strumenti elettronici – la Hewlett Packard – progettò proprio per questo scopo il suo primo minicomputer… avviandosi coì lungo la strada che ne ha fatto un gigante dell'informatica. Strutture relativamente complesse (per l'epoca…) basate su più minicomputer consentirono di portare l'uomo sulla Luna, col progetto Apollo, e permisero di realizzare i primi aerei da caccia «dinamicamente instabili», il cui assetto di volo era garantito solo dal sistema di elaborazione che li controllava – e che era in grandissima misura invisibile al pilota. Già alla metà degli anni Sessanta comparvero numerose applicazioni di tipo industriale (per il controllo di macchine utensili o di processi industriali), di automazione e anche nel settore delle telecomunicazioni (le centrali telefoniche di tipo digitale). In tutti questi casi, il calcolatore riceve *informazione* dal sistema esterno – (si tratta di *segnali* opportunamente tradotti e trasformati) – e fornisce *informazione* al sistema esterno *nella forma in cui questo la richiede*. Certamente, anche i precedenti dispositivi e sistemi (non solo elettronici) per il controllo o per le telecomunicazioni operavano sulla stessa base: le nuove soluzioni sono però *riadattabili, espandibili, flessibili* – tutti aspetti che ovviamente abbattono i costi (grazie ai volumi di produzione) e consentono una facile riutilizzazione anche di parti significative dei progetti. Fondamentalmente, *il progetto si concentra su software e interfacce – non c'è un approccio di progetto «integrato»*.

Il nuovo passo importante si compie nella prima metà degli anni '70, quando vengono posti sul mercato i primi microprocessori. Il costo della CPU crolla (siamo ora sull'ordine dei dollari), come quello delle memorie (non più il mitico «un centesimo per un bit» ma pochi dollari per decine di migliaia di bit), le dimensioni si riducono anch'esse di ordini di grandezza. Un aspetto interessante è che il microprocessore viene visto inizialmente *come un'unità per sistemi dedicati ad applicazioni diverse da quelle di calcolo* – il «personal computer» nasce *dopo* i sistemi «dedicati»! Da principio, si poteva quasi parlare di «una soluzione in cerca di problemi», a parte i settori in cui il microprocessore spodesta l'elettronica convenzionale o, in qualche caso, i minicomputer: al punto che l'istituto americano degli ingegneri elettrotecnici ed elettronici (il prestigiose IEEE) lancia un premio per la «applicazione più innovativa» dei microprocessori.

Per diversi anni le prestazioni dei microprocessori restano molto inferiori a quelle dei calcolatori «standard», siano essi mainframe o mini. D'altra parte, le cifre di merito richieste dalle applicazioni spesso non sono quelle classiche – velocità, dimensione della memoria, capacità di eseguire operazioni complesse – ma sono legate piuttosto ai *vincoli di progetto* imposti dall'ambito applicativo: *tempo reale, robustezza, ridotto consumo, ingombro, costo …*

In effetti, la riduzione di costo e ingombro rende accettabili soluzioni nelle quali si inserisce una molteplicità di microprocessori, ricavando dalla simultaneità delle loro elaborazioni il livello di prestazione che la tecnologia della singola unità non consentirebbe; architetture di questo tipo permettono anche di ottenere quella

robustezza spesso richiesta – intesa come affidabilità o meglio ancora come capacità di sopravvivere all'insorgere di guasti – ricorrendo a qualche forma di ridondanza.

Tutto questo ci porta alla situazione attuale e all'argomento della mia presentazione: la comparsa dei cosiddetti *sistemi embedded*. Non esiste, purtroppo, una definizione italiana perfettamente equivalente: abbiamo a che fare con sistemi digitali – considerati nel loro complesso hardware-software – *profondamente inseriti* nel sistema «estraneo» di cui diventano parte integrante. Il sistema digitale può avere grande complessità, ma deve risultare *trasparente* all'utente finale; è l'applicazione che guida il progetto, in termini tecnici e anche in termini economici.

Ecco un punto fondamentale: ci troviamo ad affrontare *un nuovo modo di progettare*. Ora, la descrizione di quello che il sistema complessivo dovrà realizzare, e la definizione dei vincoli (costo, affidabilità e così via) – quello che costituisce la *specifica del sistema*, a un livello di astrazione molto alto – *non prefigurano la realizzazione*, contrariamente a quanto succedeva nei sistemi tradizionali basati su micro- e mini-processore, nei quali si trattava essenzialmente di specializzare mediante software e dispositivi periferici una soluzione pre-esistente. Ora, esaminare la specifica del sistema porta a individuare un insieme di algoritmi risolutivi ancora indipendenti dall'elettronica che li implementerà. È da tali algoritmi, oltre che dalle disponibilità tecnologiche e dai vincoli progettuali, che finalmente si estrae il «disegno» del sistema embedded, che include in particolare aspetti quali le scelte riguardanti l'architettura del sistema, le tecnologie da adottare, la distribuzione dei compiti fra il software eseguito dai microprocessori e lo hardware progettato in modo specifico (il cosiddetto *hardware-software codesign*). Affrontare il progetto in questi termini significa, fra l'altro, non escludere a priori come potenziale destinazione di un sistema embedded alcun possibile campo di applicazione e non rifiutare di analizzare alcun problema.

Che cosa è successo finora? L'industria si è concentrata sulle applicazioni a grandissimo volume: chiaramente, in questi casi il valore aggiunto del progetto si gioca al meglio – l'ambito dei sistemi embedded mette fortemente in rilievo il valore aggiunto del progetto rispetto ai costi fissi delle tecnologie. Peraltro, l'applicazione può stimolare gli sviluppi tecnologici – e a sua volta la tecnologia permette di sviluppare nuove applicazioni.

Lo scenario attuale – come è presentato dai risultati delle ricerche e degli sviluppi più recenti – apre prospettive di grande rilevanza. La disponibilità di *sensori su silicio* (o se non altro *compatibili* con il silicio) che consentono di rilevare grandezze come temperatura, umidità, accelerazione, inclinazione, presenza di particolari gas, particolari fenomeni di corrosione, e di trasferire immediatamente l'informazione raccolta al microprocessore che la elabora, apre nuovi campi di applicazione. La creazione nel silicio monolitico di dispositivi *meccanici* estremamente miniaturizzati e immediatamente compatibili con la microelettronica circostante (si parla di *micromeccanica* e di dispositivi MEM) o di dispositivi *fluidici* (è il caso

della microfluidica, particolarmente attraente data la possibilità di controllare con grande precisione la temperatura nel silicio monolitico), consente anche di trasferire (in modo bidirezionale) informazione fra microprocessori e sistemi esterni di natura non elettronica mantenendo la miniaturizzazione estrema e la compatibilità immediata fra tutti i componenti. In definitiva, sensori ed attuatori diventano parte inscindibile del sistema microelettronico, *che a sua volta diventa componente integrante del sistema globale*. Il consumo di potenza si pone come un fattore essenziale del progetto: si va da soluzioni a basso consumo di potenza – alimentate da batterie cui si richiede una vita molto lunga o, in prospettiva, da celle a combustibile – a soluzioni sostanzialmente passive – nelle quali i nodi del sistema microelettronico vengono alimentati in radiofrequenza da poche unità attive (solo pochi elementi ad alto livello sono alimentati) – o infine a soluzioni che ricorrono al cosiddetto *energy scavenging*, nelle quali cioè l'energia viene estratta dall'ambiente (si tratti dell'oramai «solita» energia solare o di energia fornita dalle vibrazioni, dal flusso di un liquido, qualcuno propone addirittura dal rumore elettromagnetico presente nell'ambiente). Diventa possibile creare e gestire *sistemi* (di cui le singole unità *embedded* sono componenti integranti ma non necessariamente caratterizzanti) di *grandissima complessità*, che riflettono la realtà dell'applicazione senza il bisogno di ridurla a composizione di casi semplici trattati individualmente. L'inserimento di tali sistemi nella realtà della vita quotidiana e nel sociale conduce a una modifica radicale della qualità di prodotti, servizi, ambiente e processi produttivi.

La predisposizione alla comunicazione in radio frequenza integrata nello stesso microprocessore garantisce l'intrinseca capacità di *trasmettere e interconnettersi in rete*, così che il «sistema» complessivo di cui si può disporre è di fatto una rete di dispositivi («nodi») individualmente capaci di raccogliere e fornire informazione, elaborarla, memorizzarla e trasmetterla, se non addirittura una rete di reti; ciò garantisce fra l'altro l'adattabilità dinamica del sistema alle modifiche del carico di lavoro o dell'ambiente e all'insorgere di guasti. Siamo giunti alle cosiddette *sensor networks*, cioè a reti radio costituite da un (grande) numero di unità intelligenti dotate di sensori, nel cui progetto si giocano con la massima libertà tutte le componenti della «ICT» – la «Information and Communication Technology».

In un recente rapporto del National Research Council riguardante le sensor networks (definite come soluzioni «Embedded, Everywhere», veramente pervasive nel senso più completo) si dice che la rivoluzione oggi in atto «could well dwarf previous revolutions in the information revolution». Esempi di applicazioni vanno dalla sorveglianza e dal monitoraggio dell'inquinamento, del traffico, dell'agricoltura e delle infrastrutture civili, al supporto ad anziani o disabili, al monitoraggio continuo dei più vari parametri vitali per i pazienti di un ospedale … e ovviamente, almeno altrettante applicazioni sono previste (o già attuate) nel campo della difesa, dove sensori di gas o di radioattività o più in genere di sostanze nocive consentono l'identificazione di «regioni» a concentrazione abnorme. Il «target tracking» permette l'identificazione e l'inseguimento sul territorio di potenziali obiettivi mobili… e

(come si è letto anche nei rapporti dal fronte iracheno) camiciole in cui si può dire che la rete di sensori sia addirittura «intessuta» consentono di controllare con continuità non solo la posizione, ma anche lo stato di stress e di salute del combattente.

Anche in ambito civile, esistono già interessanti applicazioni delle «sensor networks», sia pure a livello sperimentale. Negli Stati Uniti sono in corso esperimenti per il monitoraggio delle sequoie nell'Orto Botanico dell'Università di California, per il monitoraggio dei nidi di uccelli marini su Great Duck Island (Maine) e (qualcosa di molto più commerciale…) per il monitoraggio dei vigneti nella Napa Valley: in genere, si può pensare ad una «agricoltura di precisione».

In Italia si sta pensando ad applicazioni che possano portare – ad esempio – al controllo capillare e continuo dello stato di beni culturali grazie a nodi dotati di sensori quali inclinometri, accelerometri, sensori di umidità, che – incorporati in una costruzione – estraggano informazioni sul suo stato di conservazione, la elaborino e trasmettano via radio i risultati significativi a «nodi» più potenti e via via a una centrale di controllo. Si tratterebbe di una soluzione particolarmente utile per quei beni culturali situati in zone difficilmente raggiungibili per un monitoraggio tradizionale. Un altro campo potenzialmente molto rilevante riguarda la protezione civile: le soluzioni proposte ad oggi – ad esempio, per il controllo delle frane, di fenomeni di bradisismo, subsidenze etc. – si basano essenzialmente su rilevamento *da satellite* mediante particolari sensori radar, oppure su rilevamento da *sensori a terra* (es., sensori laser) che trasmettono informazione a sistemi GPS; si tratta di soluzioni adatte a fenomeni relativamente lenti e che ammettono un numero ridotto di punti di rilevamento.

Una possibilità innovativa è offerta dalla diffusione di un *numero molto alto* di *sensori intelligenti* collegati in radiofrequenza in una rete che a sua volta comunica (eventualmente via satellite) con centrali remote: si possono gestire così anche fenomeni molto veloci (quali le valanghe o anche gli incendi). Per altri casi la soluzione diventa *complementare* rispetto alle precedenti; comunque, il *sistema* ora è l'ambiente, nel quale si «inserisce» la rete di elaborazione.

E se i sistemi *embedded* sono immersi in un sistema biologico? Molte tecnologie sono già in fase di sperimentazione, dal controllo della temperatura o di altri parametri vitali dei capi di bestiame mediante dispositivi collegati via radio (RFID) che vengono «stimolati» da un piccolo apparecchio nella tasca del veterinario, al controllo dello sviluppo di microorganismi nei mangimi o in genere nei raccolti e negli alimenti. Molta ricerca è rivolta alla creazione di *Biosensori* – ad esempio, immunosensori – capaci di immobilizzare gli anticorpi e riconoscere specifici antigeni, e all'uso di *microfluidica* mediante la creazione di condotti capillari nel silicio cui viene avviato – ad esempio – il campione di sangue; in prospettiva, nell'unico dispositivo di silicio si potranno integrare sensori, microprocessore e sezione in radiofrequenza che trasmetta i risultati al medico o alla struttura ospedaliera. La cartella clinica diventa una registrazione continua dello stato di salute del paziente.

I prossimi passi ci portano al confine fra microelettronica e biologia. Oggi

alcuni centri di ricerca propongono anche sensori e attuatori *di natura biologica…* un esperimento di frontiera vede la giunzione diretta fra neuroni e dispositivi microelettronici, così da creare una sinergia fra elettronica e biologia che va ben al di là del «biosensing». Si crea, di fatto, una comunicazione bidirezionale fra cellule viventi (quali i neuroni) e i dispositivi elettronici: i segnali dei neuroni possono essere rilevati, elaborati, e anche fatti scattare dai dispositivi microelettronici. È il primo passo verso protesi controllate dal cervello, con retroazione sensorimotoria in tempo reale o impianti per ristabilire funzionalità neurologica o sensoriale dopo un incidente o una malattia; gli scienziati si concentrano sulla creazione di una sinapsi artificiale di natura chimica fra neuroni e dispositivo microelettronico, senza la perdita di funzionalità. In prospettiva, non tanto una protesi quanto una «integrazione» della struttura fisica!