

ROBOTICA

# La modularità per configurazioni specializzate

di Rezia Molfino

In robotica si parla molto e da tempo di modularità: sinora poche sono le evidenze di modularità sul mercato. Il termine modularità può essere inteso a diversi livelli del ciclo di vita del robot: livello di modellazione del componente, livello di componente modulare, livello di sistema multi-robot e livello di impianto.

Nel livello di modellazione del componente, il modulo o feature rappresenta un'entità di riferimento del disegno che può essere usata in forma scalata o parametrizzata. La modularità a livello di progettazione è stata studiata estensivamente e ha orientato le nuove generazioni di modellatori solidi. La progettazione modulare è un concetto universalmente accettato e che viene oggi esteso collegando caratteristiche puramente geometriche a funzionalità operative e produttive fino a caratteristiche più simboliche per la propagazione dell'obiettivo progettuale [1].

Il livello di componente modulare è inteso come un olone mecatronico completo di meccanica, azionamenti, sensori e controllo, dotato di un numero ridotto di gradi di libertà, tipicamente uno, e di opportune interfacce per collegarsi ad altri oloni con le stesse o differenti funzionalità al fine di comporre un robot o una macchina più complessa. A questo livello, che ritengo di grande interesse industriale, è dedicato l'articolo. Il livello di sistema multi-robot è inteso come un insieme di moduli robot capaci di comunicare e

cooperare a un fine comune.

Appartengono a questa categoria colonie e sciami di robot, costituiti generalmente da molti minirobot a pochissimi gradi di libertà, liberi di muoversi e di riconfigurarsi autonomamente e sistemi costituiti da pochi robot a mobilità non completa, identici, per esempio per il trasporto di carichi elevati, o di differente architettura per esempio per l'esecuzione di compiti complessi di saldatura e sbavatura dove un robot ha il compito di presentare il pezzo opportunamente orientato mentre un altro ha compiti operativi. Sistemi multi-robot sono sistemi dove la mobilità funzionale al compito è solo in parte ottenuta meccanicamente, in parte essendo affidata a strategie di controllo cooperativo basate su efficienti sistemi di comunicazione e trasmissione dati. La modularità, in questo caso, è giocata a livello di moduli robot, generalmente a mobilità ridotta che possono essere configurati in differenti architetture meccaniche e software.

Nel livello di impianto, infine, dove per impianto modulare s'intende un impianto la cui architettura presenta dei nodi in ognuno dei quali può accogliere moduli-risorse differenti, al limite nessuna, potendosi adattare con modalità plug-and-produce a differenti esigenze produttive. Impianti modulari costituiti da moduli operativi facilmente intercambiabili offrono soluzioni intermedie tra impianti dedicati e impianti agili: impianti modulari presentano forme di flessibilità

**In robotica da tempo si parla di modularità. Nel passato si è cercato di progettare sistemi robotici general-purpose. Un altro approccio, invece, prevede la progettazione di macchine specifiche per applicazioni specializzate: un robot modulare è configurato a partire da un insieme di moduli membri e giunti-attuatori di differenti dimensioni e specifiche prestazionali**

off-line cosiddette di riconfigurabilità [2]. Hanno i vantaggi di tempi di attraversamento intermedi rispetto alle soluzioni dedicate e agile, di un maggiore sfruttamento del capitale investito, della possibilità di limitare gli investimenti iniziali e di aggiornamento ed estensione dell'impianto. La loro flessibilità di riconfigurazione li rende particolarmente idonei per

**Il livello di componente modulare è inteso come un olone mecatronico completo per collegarsi ad altri oloni con stesse o differenti funzionalità**



dimostrazione su pre-serie e a far fronte a picchi di produzione ed eventi di guasto. In questo caso riveste grande importanza la disponibilità di simulatori che, a partire da una base di dati dei moduli-risorse disponibili, permettano di confrontare e valutare soluzioni alternative di lay-out sia in fase di progettazione sia in fase di riconfigurazione. Se questi simulatori sono basati su modelli sufficientemente dettagliati possono essere utilizzati anche per la definizione e messa a punto di strategie di controllo e gestione per assegnati ordini e cicli di produzione.

## IL COMPONENTE MODULO-OLONE

Nel passato si è cercato di progettare sistemi robotici general-purpose, capaci di eseguire compiti complessi e diverse tipologie di compiti in differenti settori. Tali macchine, per la loro propria natura, risultano complesse e costose con conseguenti problemi di robustezza e affidabilità. Le dimensioni del mercato per particolari applicazioni sono molto ridotte ma le tipologie dei compiti e le specifiche operative coperte dai settori applicativi sono estremamente ampie. Quindi non è possibile soddisfare la moltitudine delle richieste anche ricorrendo alla più complicata macchina concepibile utilizzando l'attuale tecnologia. Un altro approccio è quello offerto dalla robotica strumentale secondo cui specifiche macchine sono progettate per applicazioni specializzate; queste sono più semplici da progettare a causa delle specifiche ridotte. Tuttavia questo approccio riduce l'ampiezza del mercato potenziale e, conseguentemente, lo sviluppo commerciale è limitato. In vista di queste esperienze contraddittorie la

modularità si presenta come un'alternativa percorribile. In effetti molti costruttori di dispositivi robotici oggi costruiscono regolarmente moduli ma non li riconoscono e commercializzano come tali. Piuttosto essi sono semplicemente considerati come componenti o sotto-assemblati proprietari progettati per specifiche applicazioni. Questa modularità 'in casa' è vista come proprietà intellettuale di un'industria e protetta come tale. Non esiste una fornitura universale di componenti e quindi ricercatori e imprese commerciali devono progettare i propri componenti con considerevole spreco.

Un robot modulare è progettato o, per meglio dire, configurato a partire da un insieme di moduli membri e giunti-attuatori di differenti dimensioni e specifiche prestazionali. La modularità nel disegno meccanico, elettrico ed elettronico permette di configurare un manipolatore ottimale per il compito attuale. Il concetto di modularità nella sua accezione più ampia include algoritmi di controllo e software di programmazione e pianificazione. Con queste caratteristiche il robot modulare può essere configurato per soddisfare le richieste di nuovi compiti direttamente sul sito d'applicazione.

La filosofia del progetto modulare prevede che ogni modulo abbia un microprocessore integrato che contiene informazioni sul modulo stesso. Queste informazioni sono comunicate al controllo per il calcolo automatico della cinematica e dinamica all'atto della configurazione del sistema. Il microprocessore servirà anche come controllore di basso livello per l'attuazione del giunto. È stato introdotto il concetto di modulo-olone completo di attuatori, sensori e controllo del moto. A seconda di come avviene

la composizione di detti moduli in architetture robotiche differenti si possono evidenziare accoppiamenti cinematici e dinamici per cui il robot modulare è un sistema Mimo con forti non-linearità. Si devono risolvere problemi non semplici di suddivisione dei compiti di controllo tra i diversi moduli, per cui alcuni ricercatori hanno sviluppato algoritmi che, a partire dalla descrizione dei moduli della catena cinematica, inclusa nei singoli microprocessori, automaticamente creano i modelli cinematici, dinamici e di controllo del robot. Per ora quest'approccio è dedicato a robot a catena cinematica aperta seriale. Sulla base di modelli analoghi è possibile sviluppare simulatori che siano in grado di mappare off-line le caratteristiche del compito in termini di spazio di lavoro, velocità, accelerazione e accuratezza del terminale per differenti configurazioni del robot. Questi simulatori permettono di determinare la configurazione ottimale del robot per un'assegnata classe di compiti. Ogni modulo deve essere dotato di connettori modulari per le interfacce meccanica, di potenza elettrica, elettronica e di trasmissione dati. I connettori per i dati possono servire anche come bus di controllo durante l'esecuzione delle operazioni. Alla Carnegie Mellon University sono state sviluppate architetture di controllo in tempo reale per robot modulari [3].

## ALCUNI ESEMPI DI PROGETTI

Il robot LRB3, sviluppato al DLR Institute of Robotics and Mechatronics at the German Aerospace Center, è stato concepito come un sistema

**Figura 1**  
Robot modulare LBR3, moduli e interfaccia grafica del simulatore (cortesia DLR).

**La filosofia del progetto modulare prevede che ogni modulo abbia un microprocessore integrato che contiene informazioni sul modulo stesso**



**Figura 2. Il robot Pride (cortesia PMARlab – Università di Genova).**

modulare componibile; l'impiego di fibra di carbonio e d'attuatori innovativi lo rendono estremamente leggero. Con l'obiettivo di ridurre i tempi di progettazione, DLR ha sviluppato un ambiente di simulazione per l'assemblaggio dei moduli in funzione di dati scenari applicativi. Esso fornisce una sorta di kit di costruzione virtuale che utilizza la libreria di moduli LBR3 (figura 1). Fanno parte dell'ambiente metodi generali di soluzione di problemi di cinematica inversa. Senza dubbio un approccio modulare alla progettazione di robot riduce i tempi di progettazione e di realizzazione. In genere anche i costi risultano ridotti. La modularità è una



premissa alla standardizzazione e, come tale, offre i maggiori vantaggi all'utente che, in teoria, potrebbe aggiornare le sue unità produttive ricomponendole, escludendo moduli ed includendone di nuovi acquisiti sul mercato, eventualmente, in caso d'effettiva standardizzazione, prodotti da costruttori differenti. Per ora è utopia ma sicuramente rappresenta un obiettivo e una tendenza.

La modularità costituisce un grande vantaggio per la manutenzione e la riparazione che risultano più

semplici, immediate e meno costose. Tuttavia la modularità in qualche modo frena la creatività progettuale verso soluzioni di robotica strumentali suggerite e adattate all'applicazione. Una penalizzazione della modularità per la robotica industriale e di servizio è dovuta alla limitata efficienza energetica dovuta all'uso di moduli componenti della stessa taglia in strutture dove le varie parti sono soggette a sollecitazioni non comparabili e in cui il dimensionamento dell'attuazione è dettato dal modulo più sollecitato e quindi il modulo può risultare sovradimensionato per le parti meno sollecitate. Un altro difetto dell'uso di moduli in catene cinematiche seriali antropomorfe è dovuto ai carichi che i motori dei moduli a valle, verso il polso, esercitano sui giunti più a monte, verso la spalla. Infatti, l'uso di moduli oloni non permette la

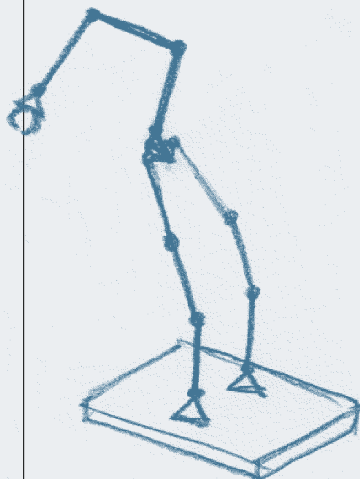


rilocazione dei motori. È interessante notare che alcune architetture meccaniche sono intrinsecamente modulari: mi riferisco in particolare alle PKM e ad alcune tipologie di dispositivi di presa. Un esempio dell'intrinseca

**Figura 3. Due configurazioni Conro (cortesia USC-ISI).**

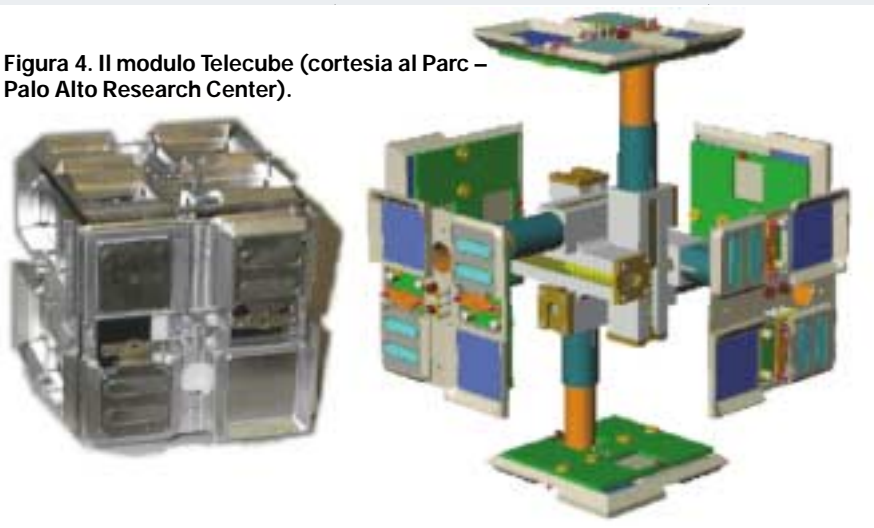


modularità dei robot ad architettura parallela è il robot assemblatore Pride, progettato e realizzato al PMARlab della Università di Genova ([www.dimec.unige.it/PMAR](http://www.dimec.unige.it/PMAR)) (figura 2). La macchina ha una cinematica delta lineare: tre moduli d'identica architettura, composti, ciascuno, da un meccanismo biella-manovella che muove un pattino lungo una guida fissa a telaio; il pattino porta un giunto universale collegato ad un'asta legata alla piattaforma mobile da un altro giunto universale opportunamente orientato rispetto a quello sul pattino. L'insieme asta e giunti universali è un 'braccio' del



gruppo parallelo. La modularità meccanica è al livello dell'intero gruppo e delle sub-unità che lo compongono. Alcuni ricercatori hanno studiato robot modulari cellulari in cui il concetto di modularità è utilizzato al limite per la definizione di strutture ricomponibili con

**Figura 4. Il modulo Telecube (cortesia al Parc – Palo Alto Research Center).**



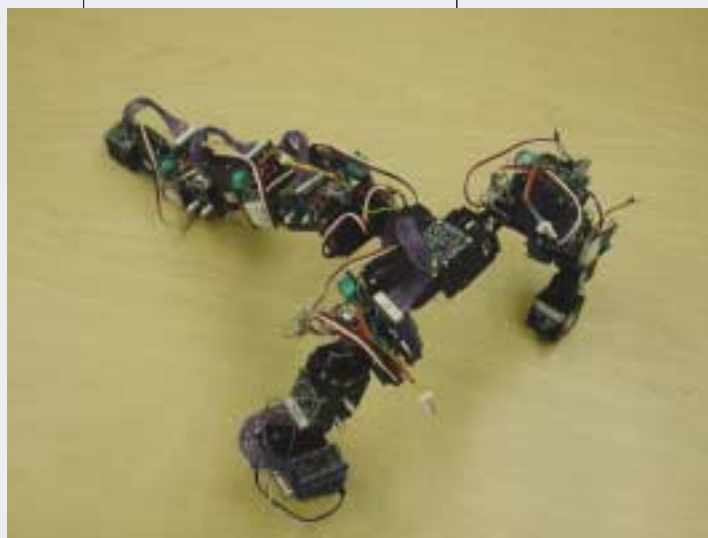
estrema flessibilità in funzione del compito.

Riporto in seguito una breve descrizione d'alcuni casi ritenuti significativi per le soluzioni tecnologiche adottate.

Il progetto Conro all'Information Science Institute dell'USC (University of Southern California) ha sviluppato un minirobot mobile modulare: i moduli sono identici, a un grado di libertà e possono essere riconfigurati per adattarsi all'ambiente. Ogni modulo è dotato di una CPU, un po' di memoria, una batteria, un micro-motore, una varietà di sensori e connessione wireless. Nella topologia di base i moduli sono semplicemente connessi in serie, come un serpente, ma si possono riconfigurare in strutture

articolate con appendici come gambe.

Il centro di ricerca sui robot modulari di Palo Alto ha sviluppato il modulo Telecube. Questo modulo ha forma di cubo ed è dotato di tre gradi di libertà di traslazione in quanto le facce possono estendersi telescopicamente fino a raddoppiare la lunghezza in ogni dimensione. Ogni faccia è dotata di un meccanismo d'interfaccia a



La rete tematica Clawar vuole proporre meccanismi utili per creare una più generale modularità applicabile da una comunità più ampia

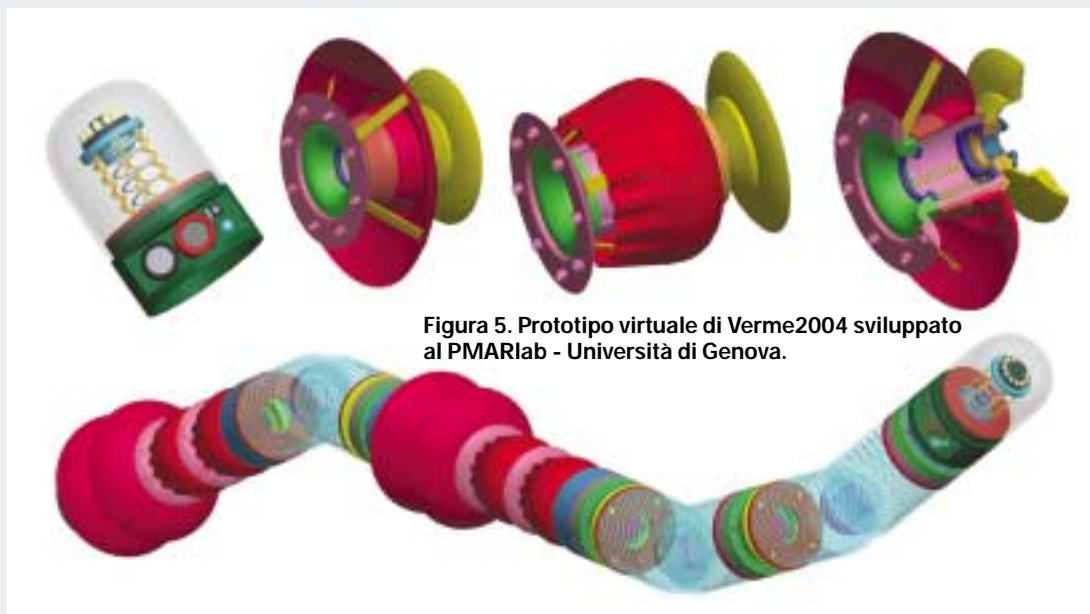


Figura 5. Prototipo virtuale di Verme2004 sviluppato al PMARlab - Università di Genova.

magneti permanenti per connettersi e sconnettersi ai/dai moduli circostanti: le interfacce sono usate per trasmettere potenza e dati. La locomozione del robot è realizzata per sequenze d'estensioni e contrazioni dei moduli. Il cubo è rappresentato in figura 4.

Al PMARlab dell'Università di Genova sono state studiate diverse tipologie di robot modulari. Il Verme2004 è stato



recentemente sviluppato per compiti d'ispezione e rescue. Sono stati progettati, oltre al sotto-modulo interfaccia, tre tipologie di moduli base con cui si possono generare configurazioni alternative: modulo testa, modulo locomozione, modulo orientamento, tutti dotati dello stesso modulo interfaccia appositamente disegnato. Le interfacce utilizzano un accoppiamento meccanico che è sbloccato da un dispositivo SMA; il modulo testa accoglie tutti i sensori eterocettivi: sensore ottico con supporto attivo, sensori di presenza umana, sensore d'esplosivi e gas. Il modulo orientamento, costituito da un'opportuna orditura di fili SMA, risulta molto leggero e permette rotazioni fino a 60°. Il modulo di

locomozione è, a sua volta, modulare e consente buon'agilità e adattamento al terreno attraverso movimenti peristaltici e giunti sferici tra i sotto-moduli. Il sotto-modulo è leggero, economico e facile da assemblare e disassemblare. L'attuazione con metalli a memoria di forma agisce su una membrana di gomma accorciando ed estendendo il sotto-modulo. In figura 5 sono riportati i moduli di testa e di locomozione e una configurazione di Verme2004.

#### RETE DI RICERCA EUROPEA

I costi di ricerca e sviluppo sono sempre crescenti e non esistono metodologie di sfruttamento della conoscenza e dell'esperienza guadagnata in precedenti situazioni pratiche. Tutti i progetti di ricerca e sviluppo hanno sperimentato questi problemi e hanno dovuto ricominciare da zero i propri sviluppi conducendo spesso a scenari di re-invenzione con spreco di tempo e di denaro. Su queste premesse si apre il progetto della robotica modulare affrontato dalla rete tematica Clawar che vuole proporre meccanismi utili per creare una più generale modularità, a livello di blocchi componenti modulari, applicabile da una comunità più ampia per la composizione di sistemi robotici del futuro. Clawar ha proposto un partizionamento dei problemi progettuali in sotto-problemi più piccoli. Questo partizionamento, dopo ampio

dibattito interno, è stato fatto secondo le seguenti aree: meccanica, sistema sensoriale, sistemi di attuazione e di potenza, sistemi di controllo hw e sw, interfacce di connessione tra le differenti aree. La metodologia di progetto proposta considera i singoli moduli come scatole nere che si interfacciano con gli altri moduli attraverso uno spazio di interazione. Lo spazio di interazione comprende data-bus che connettono i moduli in un'architettura globale di progetto [4].

Rezia Molfino, Laboratorio di Progettazione e misure per l'automazione e la robotica (Dipartimento di Meccanica e costruzione delle macchine - Università di Genova) nonché presidente SIRI.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] COTTA E., *Simultaneous Product Development: la risposta alle nuove sfide competitive nello scenario economico attuale*, "Virtual Engineering Applications for Design and Product Development: the Footwear case", Gallipoli (LE), Italy, 11-12 settembre 2003.
- [2] R. M. MOLFINO, L. E. BRUZZONE, R. P. RAZZOLI, "Modular Assembly Systems: The SPI 3 Research Programme", Proc. of the 33rd International Symposium on Robotics, Stoccolma, Svezia, 7-11 ottobre 2002.
- [3] DIAZ-CALDERON, C.J.J. PAREDIS, P. K. KHOSLA, "Organization and Selection of Re-configurable Models", Proceedings of the Winter Simulation Conference 2000, Orlando, Florida, 10-13 dicembre 2000.
- [4] VIRK, G.S., *Clawar - robot component modularity*, Proceedings of the 5th Int Conf on Climbing and Walking Robots (Clawar 2002), Parigi, pp. 875-880, Professional Engineering Publishing, 25-27 settembre 2002.