

Robotica industriale umano-centrica: il progetto Rosetta

Il progetto Rosetta, finanziato dall'Unione Europea, sviluppa una nuova generazione di sistemi di controllo per robot industriali che lavoreranno a stretto contatto con gli uomini. La nuova tecnologia "umano-centrica" non solo renderà i robot industriali più simili all'uomo ma consentirà loro di operare con maggiore autonomia e di interagire con gli operatori umani, senza dispositivi fisici di separazione, con modalità che saranno percepite come naturali e innocue. Questi robot saranno anche programmati in maniera intuitiva ed efficiente, rendendo possibile adattarli facilmente a nuovi compiti quando una linea di produzione è modificata per produrre un nuovo bene. Di seguito sono descritti gli obiettivi del progetto, soffermandosi sulle azioni previste per garantire l'interazione fisica in condizioni di sicurezza tra uomo e robot.

Luca Bascetta
Paolo Bolzern
Gianni Ferretti
Bakir Lacevic
Arturo Locatelli
Gianantonio Magnani
Paolo Rocco
Nicola Schiavoni
Andrea Maria Zanchettin

Keyword

Robotica,
automazione
flessibile,
interazione
uomo-robot,
sensori

GLI AUTORI

L. Bascetta, P. Bolzern, G. Ferretti, B. Lacevic, A. Locatelli, G. Magnani, P. Rocco, N. Schiavoni, A. M. Zanchettin - Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano, Italia

Recenti analisi mostrano come le fabbriche del futuro produrranno sempre più beni con alti volumi di produzione, ma con molte varianti e breve ciclo di vita del prodotto. Questo modello produttivo richiede un sistema manifatturiero flessibile che consente frequenti cambiamenti nella produzione. I sistemi robotici sono la soluzione di automazione d'elezione per raggiungere questi obiettivi, ma necessitano di adattarsi a nuovi compiti in maniera ancora più rapida di come siano in grado di farlo oggi, e di raggiungere la piena produzione più velocemente. Inoltre è essenziale poter integrare facilmente nelle linee di produzione i robot con gli operatori umani, dal momento che la combinazione delle operazioni di robot e di operatori umani consente il più alto livello di flessibilità. I compiti difficili da automatizzare rimarranno, in questo scenario, dominio dell'operatore umano, mentre le operazioni con soglia di automazione contenuta o con requisiti di alta qualità saranno eseguite dai robot.

Per affrontare queste problematiche l'Unione Europea ha finanziato, nell'ambito del Settimo Programma Quadro di Ricerca, il Progetto Europeo Integrato di Larga Scala Rosetta (RObot control for Skilled ExecuTion of Tasks in natural interaction with humans; based on Autonomy, cumulative knowledge and learning), della durata di 4 anni, partito nel Marzo 2009 [1]. Il progetto, coordinato da ABB, sviluppa la cosiddetta tecnologia "umano-centrica" per i robot industriali del futuro, che non solo appariranno più simili all'uomo e opereranno con maggiore autonomia, ma che apprenderanno, coopereranno e interagiranno con gli operatori umani, con modalità che saranno percepite come naturali e innocue. Questi robot saranno programmati in maniera intuitiva

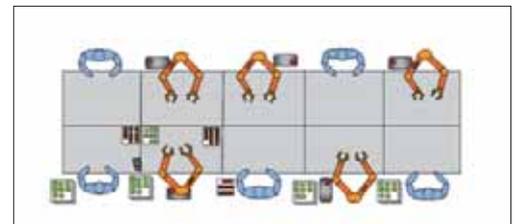


Figura 1 - Fabbrica del futuro: cooperazione tra uomo e robot

ed efficiente, rendendo possibile adattarli facilmente a nuovi compiti quando una linea di produzione è modificata per produrre un nuovo bene. La figura 1 esemplifica il concetto della fabbrica del futuro alla base del progetto Rosetta.

Il progetto affronta queste sfide sviluppando metodi per ingegnerizzare e programmare sistemi robotici in modalità che sono più intuitive, più legate al compito ("task"), e meno specifiche rispetto all'installazione. Questo richiederà che i robot siano in grado di eseguire compiti in modo più autonomo, senza il bisogno di una dettagliata descrizione di ogni passo, e porterà a una significativa riduzione dello sforzo di programmazione. Una volta programmati, i robot useranno tecniche di apprendimento basate su sensori per migliorare autonomamente le proprie abilità ("skill") in modo da realizzare i compiti rapidamente. Quando l'operazione è ottimizzata, il robot condivide la conoscenza su come realizzare al meglio l'operazione con altri robot, inviando i parametri via rete a un server centrale. Altri robot operano allo stesso modo, il che dà luogo rapidamente alla realizzazione di una conoscenza condivisa ("cumulative learning"). L'immagazzinamento e la condivisione dei dati legati alla produzione faranno uso delle più recenti tecniche sviluppate

per il Web 2.0, rappresentando tali dati in forma di “conoscenza” che può essere accumulata, migliorata e riutilizzata da una moltitudine di robot.

Lo scenario produttivo in cui robot e operatori umani lavorano fianco a fianco e interagiscono in condizioni di sicurezza richiede di individuare metodologie di progetto, controllo e supervisione tali da rendere i robot innocui e in grado di agire in modo che l'uomo si senta a proprio agio in loro presenza. Ne consegue la necessità di sviluppare movimenti del robot che risultino simili a quelli dei bracci umani, predisporre strumenti per l'interazione vocale ed evitare in generale qualunque situazione che possa costituire un pericolo o anche comportare una situazione di disagio per gli operatori umani. La cooperazione uomo-macchina sarà quindi monitorata da un sistema sensoriale multi-livello, che coinvolge differenti tipi di sensori, e da un'unità “intelligente” che analizzerà l'ambiente in cui è inserito il robot e darà al robot in tempo reale istruzioni su come adattarsi a cambiamenti dell'ambiente e alla presenza dell'uomo.

Le metodologie ingegneristiche e di produzione sviluppate nel progetto renderanno l'automazione robotica accessibile per una varietà di nuove applicazioni, in particolare laddove la produzione si deve adattare di frequente a nuove linee di prodotto. Questo consentirà all'industria, e in particolare all'industria europea, di migliorare la propria competitività riducendo i costi di produzione e incrementando la qualità di produzione. Inoltre la comprensione approfondita e la modellazione del contatto e dell'interazione tra uomo e robot in uno scenario produttivo consentiranno di classificare il rischio di lesione, con l'obiettivo di creare standard di sicurezza per la cooperazione uomo-robot, aiutando l'industria a utilizzare al meglio le potenzialità dei robot operanti in ambienti umani.

In sintesi il progetto Rosetta si pone i seguenti quattro obiettivi:

- Consentire ai robot di essere utilizzati per compiti complessi con alta flessibilità e robustezza;
- Ridurre l'impegno richiesto dall'installazione, per consentire un veloce cambio di produzione dal prodotto A al prodotto B;
- Predisporre un sistema di programma-

zione di semplice uso in modo da poter accedere alle funzionalità del robot Rosetta senza il bisogno di programmatori di robot esperti;

- Concepire nuovi metodi di misura e controllo per l'interazione sicura tra uomo e robot.

Il presente articolo si soffermerà sull'ultimo dei quattro obiettivi, sul quale il gruppo di ricerca del Politecnico di Milano è particolarmente attivo.

Interazione sicura uomo-robot

Nonostante la robustezza e l'affidabilità dei robot industriali sia cresciuta notevolmente negli ultimi anni, i comuni manipolatori industriali non sono ancora in grado di essere utilizzati per cooperare in modo naturale con operatori umani. Al contrario, è nella robotica di servizio che, dal punto di vista dello sviluppo di tecnologie innovative, stiamo assistendo a notevoli passi avanti riguardo l'integrazione tra uomo e macchina. In quest'ambito si possono trovare numerose applicazioni nelle quali i robot sono chiamati ad operare in ambienti altamente non strutturati e talvolta a diretto contatto con l'uomo.

Secondo il Dipartimento di Statistica dell'IFR (International Federation of Robotics), mentre nel 2006 il rapporto tra robot di servizio e robot industriali era di circa 1 a 3,7, per il 2011 questo valore si prevede possa quasi raddoppiare [2].

D'altra parte, sebbene nell'ambito della robotica industriale si siano registrati innumerevoli progressi, la tecnologia attuale non sembra essere sufficiente a permettere una più diretta cooperazione tra uomo e robot.

Nella maggior parte delle applicazioni industriali lo spazio di lavoro del robot è delimitato da protezioni metalliche, spesso invalicabili dall'uomo, fintanto che il robot stesso è in funzione. Differenti tipi di sensori, da semplici fotocellule a più sofisticate telecamere di sorveglianza, sono utilizzati per rilevare eventuali intrusioni e generare gli allarmi che, nella generalità delle situazioni, portano a interrompere il ciclo di produzione e, quindi, a fermare il robot. Questa sostanziale differenza tra robotica industriale e di servizio trova una più che naturale giustificazione in questioni riguardanti la sicurezza. L'applicazione industriale deve infatti sottostare a numerose regolamentazioni che limitano,

almeno fino ad oggi, la possibilità di impiegare robot a stretto contatto con operatori umani.

Da questo punto di vista, si possono delineare due differenti strategie di ricerca nell'ambito della cooperazione o della coesistenza uomo-macchina: alcune riguardano la cosiddetta “sicurezza attiva”, altre la “sicurezza passiva”.

In breve, per sicurezza passiva si intende l'impiego di robot che siano intrinsecamente sicuri (ad esempio aventi una struttura leggera e flessibile) nei confronti di possibili danni a persone e cose che, erroneamente, si introducono nel loro spazio di lavoro. Viceversa, per sicurezza attiva si intende l'adozione di tecnologie, sensoriali e di controllo, atte ad evitare situazioni pericolose, tanto per l'incolumità fisica delle persone, quanto per il potenziale impatto psicologico su queste. La sicurezza attiva presenta aspetti di interesse sia in ottica industriale sia dal punto di vista della ricerca, in particolare in vista della disponibilità di sensori sofisticati, a prezzi sempre più accessibili.

La vera sfida per il futuro della robotica industriale consiste quindi nell'integrare le svariate capacità dei sensori oggi disponibili sul mercato con algoritmi di controllo sempre più sofisticati, che permettano la coesistenza, e in certe situazioni anche la cooperazione, tra uomo e robot in spazi di lavoro contigui. Le conseguenze in ambito industriale sarebbero degne di nota: da una parte l'operatore umano sarebbe in grado di avvicinarsi alla zona di lavoro del robot, ad esempio per ispezione, senza che questo fermi il ciclo di produzione o ne riduca in qualche modo la velocità. Inoltre, sarebbe possibile anche una diretta cooperazione (come il passaggio fisico di un pezzo, o l'accesso alla stessa area di lavoro) tra uomo e robot all'interno di un comune spazio di lavoro.

L'approccio del progetto Rosetta alla sicurezza

Il progetto Rosetta sviluppa una strategia complessa e innovativa per conseguire gli obiettivi sopra delineati. Oltre allo studio del contatto uomo-robot, mediante l'utilizzo di modelli digitali dell'uomo, finalizzato alla classificazione delle possibili lesioni che possono occorrere in caso di impatto e quindi alla compilazione di nuove normative di sicurezza, l'approccio

attivo alla sicurezza del progetto si articola sulle seguenti linee:

- Supervisione della cella robotica per l'individuazione delle persone presenti e la stima della loro intenzione.
- Utilizzo di manipolatori cinematicamente ridondanti.
- Programmazione di moti del braccio robotico ispirati al moto del braccio umano.
- Utilizzo di sensoristica addizionale per lo sviluppo di strategie di controllo attivo in tempo reale.

Nel seguito si descriveranno brevemente gli obiettivi di ciascuna delle suddette linee d'azione.

Supervisione della cella robotica

L'ambiente occupato dal robot sarà costantemente monitorato da telecamere (comuni telecamere di sorveglianza) disposte in modo tale da inquadrare il robot stesso e un'area di opportune dimensioni intorno al robot. La figura 2 mostra un esempio di cella equipaggiata con una telecamera di sorveglianza, allestita presso il Laboratorio di Automatica del Politecnico di Milano.



Figura 2 - Riproduzione di una cella robotizzata (presso il Laboratorio di Automatica del Politecnico di Milano)

Grazie a sofisticati algoritmi di elaborazione delle immagini e di visione cognitiva, il sistema di supervisione sarà in grado di individuare eventuali persone che entrano nella scena inquadrata e di seguirne il cammino. Ulteriori algoritmi basati sia sulla classificazione statistica delle traiettorie comunemente seguite dall'uomo nel corso della propria camminata,

sia su modelli della camminata ispirati a concetti propri delle neuro scienze (per cui il percorso compiuto dipende anche dall'obiettivo che la persona intende raggiungere secondo opportuni processi, inconsci, di ottimizzazione), saranno in grado di predire il moto della persona negli istanti successivi. Questa predizione contribuirà a formare una stima dell'intenzione della persona, classificata nella volontà, da parte della persona inquadrata, di interagire in modalità differenti con il robot.

Una stima affidabile e sufficientemente pronta dell'intenzione della persona può contribuire ad attivare con un opportuno anticipo la strategia di sicurezza attiva più consona con l'interpretazione della situazione.

Utilizzo di manipolatori cinematicamente ridondanti

Nel contesto precedentemente delineato della robotica industriale, un elemento di novità significativo è costituito dalla disponibilità di una nuova generazione di manipolatori robotici, dotati di gradi di libertà aggiuntivi rispetto a quelli strettamente necessari per risolvere un dato compito. Oggigiorno le aziende produttrici di robot stanno infatti mettendo sul mercato manipolatori antropomorfi a 7 assi chiamati, in terminologia robotica, robot ridondanti [3]. La presenza di un grado di libertà aggiuntivo, rispetto ai tradizionali robot a 6 assi, garantisce la possibilità di eseguire lo stesso compito in diversi modi, e quindi conferisce destrezza al braccio manipolatore. Le esigenze espresse in precedenza relative alla cooperazione (o quantomeno alla coesistenza) tra uomo e robot possono sicuramente trarre vantaggio dalla disponibilità di questi manipolatori cinematicamente ridon-

danti. Il moto programmato del robot si potrebbe infatti adattare durante il ciclo produttivo per permettere la cooperazione con operatori umani, senza peraltro alterare il compito assegnato

La ridondanza cinematica costituisce dunque una risorsa sfruttabile per garantire il soddisfacimento di compiti aggiuntivi nell'utilizzo del manipolatore robotico. La presenza di un grado di libertà aggiuntivo pone naturalmente la scelta su come utilizzarlo al meglio. Non esiste tuttavia una risposta generale a questo interrogativo, in

quanto gli obiettivi rispetto ai quali ottimizzare la pianificazione del moto dipendono essenzialmente dall'applicazione nella quale il robot è chiamato ad operare [4].

Per contro, le strategie di pianificazione e controllo del moto, consolidate per robot tradizionali, si complicano considerevolmente nei robot ridondanti: il problema di inversione cinematica risulta decisamente più complicato, sia dal punto di vista concettuale che algoritmico. Inoltre, l'adozione di robot cinematicamente ridondanti può porre significativi problemi dal punto di vista della prevedibilità del movimento. A seconda della strategia di pianificazione del moto, ossia della scelta dell'algoritmo per tradurre un dato compito pianificato a livello Cartesiano in opportune traiettorie dei singoli giunti, il comportamento del robot può risultare imprevedibile [5]. In particolare, è possibile che, durante compiti ripetitivi, situazione tutt'altro che inusuale in ambito industriale, il robot si trovi a compiere, a livello di spostamenti dei singoli assi, movimenti non più ripetitivi. Più precisamente una traiettoria chiusa dell'organo terminale si può mappare in una traiettoria aperta nello spazio dei giunti, e la configurazione finale del robot in un compito di posizionamento può dipendere dalla traiettoria pianificata per l'organo terminale anche se il moto del robot parte dalla medesima configurazione.

Il problema appena delineato viene chiamato ripetibilità. La questione della ripetibilità ha impatti anche a livello di programmazione del moto: in assenza di ripetibilità prevedere quale sarà la posizione del robot anche soltanto dopo qualche ciclo di produzione risulta difficile se non impossibile. Esistono, tuttavia, metodi di inversione cinematica che garantiscono che la configurazione assunta dal robot, in termini di variabili di giunto, durante compiti ripetitivi non dipenda dal cammino percorso dall'organo terminale nello spazio operativo e quindi dal compito. Tali metodi sono detti olonomi [6-7].

Nel progetto si è studiato il problema della ripetibilità dei movimenti dal punto di vista concettuale individuando una parametrizzazione di tutti i metodi olonomi di inversione cinematica [7]. Si è anche proposta un'architettura di controllo che consente di selezionare e programmare un

particolare criterio di risoluzione della ridondanza cinematica, secondo le linee cui si farà cenno nel Paragrafo 4.

Pianificazione bio-inspirata del moto del braccio robotico

La tecnologia “umano-centrica” alla base del progetto Rosetta riguarda anche lo studio di strategie di risoluzione della ridondanza che rendano più naturale la coesistenza di umani e robot.

Mentre la sola struttura antropomorfa del manipolatore potrebbe non essere sufficiente per garantire una naturale cooperazione tra uomo e robot, l'utilizzo della ridondanza cinematica dei bracci robotici potrebbe essere finalizzato all'ottenimento di moti che richiamino, almeno a livello cinematico, i movimenti umani. Partendo dal presupposto che il più naturale movimento è quello realizzato dal braccio umano, sono stati quindi messi a punto alcuni studi del comportamento cinematico umano durante compiti di manipolazione e assemblaggio. La domanda cui questi studi intendono dare risposta è in che modo nel moto del braccio umano si sfrutti la ridondanza cinematica, in modo da replicare lo stesso criterio per la pianificazione del moto del braccio robotico [8]. Le moderne tecniche di motion capturing [9], messe a disposizione presso i laboratori di una università partner nel progetto, hanno portato ad una dettagliata analisi del movimento umano (figura 3) e serviranno, in un prossimo futuro, come linee guida per selezionare la strategia di risoluzione della ridondanza cinematica dei bracci robotici.

Strategie di controllo attivo basate su sensori esteroceettivi

Un ulteriore elemento della complessa

strategia di interazione sicura tra uomo e robot prevista dal progetto Rosetta consiste nell'utilizzo di sensoristica innovativa di corto raggio in grado di rilevare la presenza di eventuali oggetti non previsti nello spazio di lavoro del braccio robotico, compresi parti del corpo di un eventuale operatore umano presente nello stesso ambiente di lavoro. La tecnologia che viene sviluppata nel progetto per questi sensori innovativi consentirà al controllore demandato alla sicurezza di ottenere in tempo reale e con adeguata frequenza di campionamento misure di distanza dagli ostacoli che potranno essere utilizzate in leggi di controllo in anello chiuso intese a ridurre il rischio di collisioni.

A fine di disporre di uno strumento sia metodologico sia operativo per il progetto del sistema di controllo dell'interazione, nel progetto Rosetta si è sviluppato il concetto di “Kinetostatic Danger Field” (KDF) [10]: si tratta di una misura del rischio di impatto del robot con un ostacolo collocato in un punto arbitrario dello spazio di lavoro del robot. La misura è espressa da un campo vettoriale che dipende sia dalla posizione corrente del robot, sia dalla sua velocità. Una volta che l'oggetto nell'ambiente è stato individuato, il campo è valutato sulla base della distanza tra l'oggetto e il robot, la velocità del robot e l'angolo tra i vettori rappresentativi della distanza e della velocità. Il KDF è calcolabile in forma chiusa mediante operazioni algebriche elementari. La figura 4 mostra le

linee di livello del campo generato dal moto di un manipolatore a due gradi di libertà planare.

Il concetto di KDF viene poi utilizzato come ingresso per leggi di controllo [10], [11] che mirano a contenere il valore dell'indice di pericolo quantificato come l'intensità del campo vettoriale stesso, mediante opportune azioni correttive del moto del manipolatore. In presenza di ridondanza cinematica, queste azioni possono essere esercitate in modo tale da non alterare il moto dell'organo terminale del manipolatore e quindi non compromettere l'esecuzione del compito primario del manipolatore. Nella figura 5 si mostra un esempio ottenuto simulando il moto di un manipolatore in presenza di un ostacolo costituito da una sfera in movimento. L'azione correttiva di controllo è esercitata sfruttando il grado di libertà ridondante del manipolatore.

La nozione di KDF è anche alla base di alcuni algoritmi per la pianificazione del moto del braccio robotico (“path planning”) in presenza di ostacoli [12], [13]. Questi algoritmi sono caratterizzati dal-

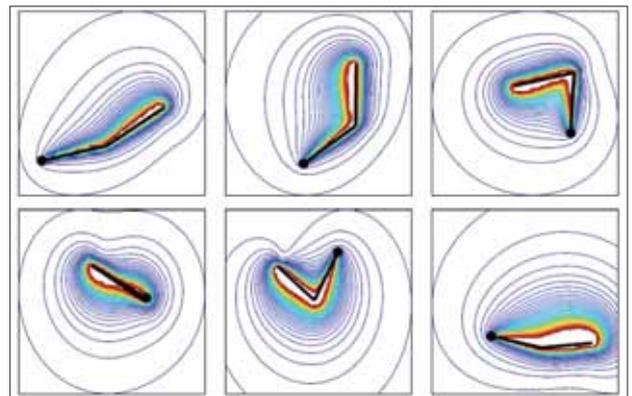


Figura 4 - Linee di livello del KDF – esempio di un manipolatore a 2 gradi di libertà: entrambi i link accelerano in senso antiorario (la base del robot è evidenziata)

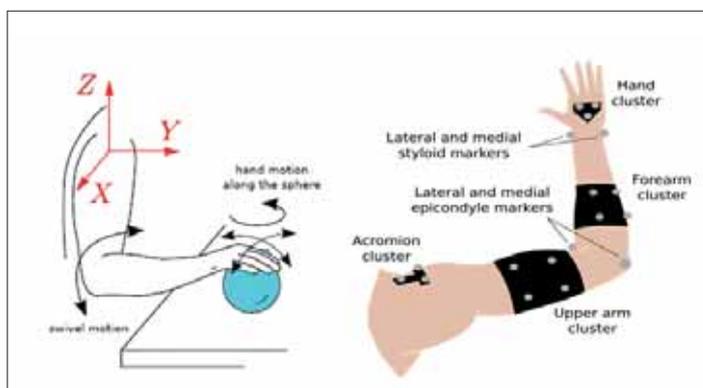


Figura 3 - Esperimenti di motion capture per lo studio del moto del braccio umano

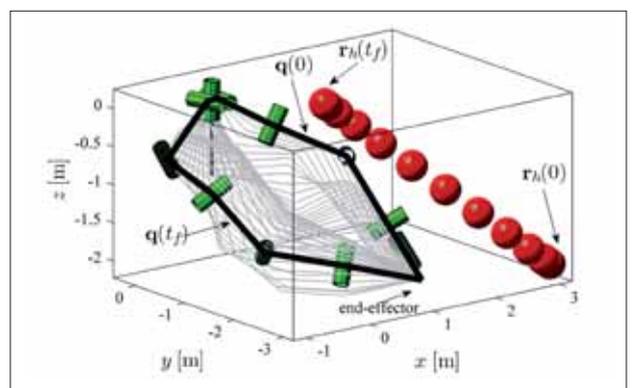


Figura 5 - Simulazione di un'azione di controllo intesa ad evitare un ostacolo

l'individuazione di percorsi che non solo evitano gli ostacoli, ma lo fanno ottimizzando l'indicatore di sicurezza.

Un'architettura per il controllo dell'interazione

Nel corso del progetto si è delineata l'esigenza di un'architettura modulare e flessibile che lasci all'utilizzatore, all'interno di un opportuno ambiente di programmazione, la scelta della politica di gestione della ridondanza cinematica, mentre renda possibile all'azienda produttrice del robot l'implementazione del codice di controllo. Al contempo, tale architettura deve essere capace di gestire al meglio gli ingressi provenienti da sensori esterocezionali, quali ad esempio telecamere o sensori di prossimità, in modo da continuare, ove possibile, la produzione anche a seguito di comportamenti anomali o non previsti da parte dell'operatore umano.

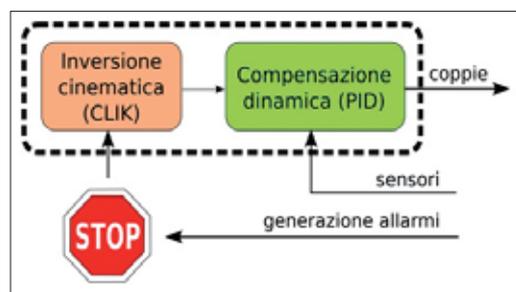


Figura 6 - Schematizzazione del tipico algoritmo di controllo del moto e di gestione degli allarmi

Infatti, nelle attuali politiche di controllo, si veda la figura 6, eventuali sensori esterocezionali vengono utilizzati prevalentemente per la generazione degli allarmi che causano l'interruzione della produzione.

La nuova architettura di controllo che permetterà l'utilizzo della tecnologia "umano-centrica" sviluppata nel progetto Rosetta, schematizzata nella figura 7, renderà invece possibile l'integrazione di sensori quali telecamere e sensori di prossimità negli anelli di controllo, per aumentare il livello di sicurezza e rendere possibile la coesistenza tra operatori umani e robot. Consentirà anche di gestire la ridondanza cinematica del manipolatore in un opportuno ambiente di programmazione offline [14].

Conclusioni

Le attuali normative di sicurezza impongono che gli ambienti di lavoro dei robot

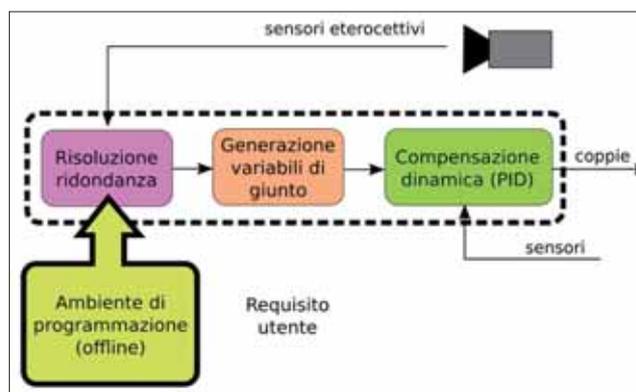


Figura 7 - Architettura di controllo modulare proposta nel progetto Rosetta

industriali e degli operatori siano fisicamente separati in modo da evitare ogni possibile interazione. Questa circostanza contribuisce a limitare l'ulteriore diffusione dei robot in contesti di produzione industriale flessibile. Uno degli obiettivi del progetto di ricerca Rosetta consiste nel superare questa limitazione, predisponendo le soluzioni tecnologiche atte a garantire un adeguato livello di sicurezza nell'interazione tra robot industriale e operatore umano. In questa memoria si sono descritte le linee secondo cui si cercherà di conseguire questo ambizioso obiettivo. La ricerca che ha condotto a questi risultati ha beneficiato del finanziamento dal Settimo Programma Quadro della Comunità Europea (FP7/2007-2013), contratto n. 230902 (Rosetta).

Riferimenti

- [1] Sito del progetto EU FP7 Rosetta: <http://www.fp7rosetta.eu/>
- [2] IEEE Spectrum, "6.5 Million Robots Now Inhabit the Earth": <http://spectrum.ieee.org/>
- [3] R.V. Patel, F. Shadpey, *Control of redundant robot manipulators*, Springer 2005.
- [4] J. Baillieul, "Kinematic programming alternatives for redundant manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985.
- [5] C. Klein, C. Huang, "Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators", *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 13, n. 3, pp. 245-250, 1983.

- [6] T. Shamir, Y. Yomdin, "Repeatability of redundant manipulators: Mathematical solution of the problem", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, n. 11, pp. 1004-1009, 1988.
- [7] P. Rocco, A.M. Zanchettin, "General parameterization of holonomic kinematic inversion algorithms for redundant manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pp. 3721-3726, 2010.
- [8] A. M. Zanchettin, P. Rocco, L. Bascetta, I. Symeonidis, S. Peldschus, "Kinematic analysis and synthesis of the human arm motion during a manipulation task", *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2011.
- [9] M. Field, D. Stirling, F. Naghdy, P. Zengxi, "Motion capture in robotics review" *IEEE International Conference on Control and Automation*, 2009.
- [10] B. Lacevic, P. Rocco, "Kinetostatic danger field - a novel safety assessment for human-robot interaction", *RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Iros 2010*, pp. 2169-2174, 2010.
- [11] B. Lacevic, P. Rocco "Safety-oriented control of robotic manipulators - a kinematic approach", *IFAC World Congress*, 2011.
- [12] B. Lacevic, P. Rocco, "Sampling-based safe path planning for robotic manipulators", *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2010*.
- [13] B. Lacevic, P. Rocco, "Towards a complete safe path planning for robotic manipulators", *RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010*, pp. 5366-5371, 2010.
- [14] A.M. Zanchettin, P. Rocco, A. Robertsson, R. Johansson, "Exploiting task redundancy in industrial manipulator during drilling operations", *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2011.