

# Un approccio alla diagnosi dei guasti per robot industriali

Fabrizio Caccavale, Luigi Villani

Negli ultimi anni sono stati prodotti notevoli sforzi di ricerca per sviluppare approcci sistematici alla Diagnosi dei Guasti (Fault Diagnosis, FD) in sistemi di varia natura. Di particolare interesse risultano i sistemi robotici, per i quali si richiede un elevato livello di sicurezza e spiccate capacità di autodiagnosi. In questa memoria viene descritto un approccio alla FD per manipolatori robotici basato su un osservatore diagnostico a tempo discreto. In particolare, due diversi algoritmi di diagnosi sono presentati e comparati criticamente attraverso esperimenti su un robot industriale a sei gradi di libertà.

L'impiego di tecniche di Diagnosi dei Guasti (Fault Diagnosis, FD) diviene sempre più importante al fine di assicurare elevati livelli di sicurezza ed affidabilità in impianti automatizzati e sistemi autonomi. Infatti, negli ultimi anni la comunità scientifica internazionale ha prodotto considerevoli sforzi per mettere a punto degli approcci sistematici alla FD in sistemi di varia natura. Una speciale attenzione è stata posta sui sistemi robotici operanti in ambienti ostili e/o remoti, per i quali è necessario assicurare un elevato grado di sicurezza e spiccate capacità di autodiagnosi. Inoltre, lo sviluppo di tecniche di FD per robot operanti in ambiente industriale è anch'esso di importanza fondamentale, al fine di assicurare una interazione uomo/macchina sicura e garantire una veloce ed appropriata reazione del sistema all'insorgenza di situazioni anomale e/o potenzialmente pericolose.

Lo scopo principale di un schema di FD è quello di monitorare un sistema durante il suo funzionamento in modo da rilevare l'occorrenza di guasti (fault detection), localizzare i guasti (fault isolation) e determinarne l'evoluzione temporale (fault identification). L'approccio alla FD basato sul modello raggiunge questi obiettivi comparando il comportamento reale del sistema monitorato con quello predetto da un modello matematico. Tipicamente, l'uscita di un sistema per la FD è un insieme di variabili sensibili all'occorrenza di guasti (residui), modificate da una firma quando il sistema è soggetto a guasto (firma di guasto). Quindi, l'informazione contenuta nelle firme di guasto viene estratta e processata per rilevare, isolare ed identificare i guasti.

I riferimenti bibliografici [1-10] presentano una ampia rassegna delle tecniche FD esistenti e degli sviluppi più recenti. In particolare, nella letteratura sono rintracciabili molti approcci alla FD per manipolatori robotici: alcune sono basate sulla stima dei parametri dinamici [9,10], altre sull'uso combinato di osservatori dello stato e logica fuzzy [11] o reti neurali [12], altre ancora su osservatori a tempo discreto [13,14], sul concetto di ridondanza analitica [15] e su tecniche non lineari adattative [16]. Tuttavia, le tecniche richiamate sono spesso caratterizzate da un elevato carico computazionale, oppure non sono progettate in modo da tener conto dei limiti dei robot convenzionali e delle loro architetture di controllo.

In questa memoria viene proposto un approccio alla FD per manipolatori robotici basato su un osservatore dello stato non lineare (osservatore diagnostico). L'obiettivo è quello di realizzare uno schema di FD per manipolatori industriali di tipo convenzionale, in grado di tener conto dei problemi tipici delle strutture di manipolazione industriali, quali, ad esempio, la conoscenza parziale di alcuni contributi presenti nel modello dinamico, gli effetti del rumore di misura e della implementazione a tempo discreto dell'osservatore.

A tale scopo, l'osservatore diagnostico viene progettato direttamente nel tempo discreto e include un termine per la compensazione dell'effetto delle dinamiche non modellate e dei disturbi. Il termine di compensazione, a sua volta, viene calcolato sulla base della dinamica del manipolatore e dell'errore di stima dello stato secondo due strategie: la prima imperniata su una stima time-delayed, la se-

conda basata su una stima ricorsiva. Quindi, le variabili sensibili ai guasti (i residui) vengono calcolate comparando le uscite dell'osservatore diagnostico con lo stato misurato del manipolatore: in tal modo si perviene ad una procedura di rilevazione dei guasti efficiente ed affidabile.

Infine, sulla base dei residui calcolati, è possibile delineare anche una procedura di isolamento ed identificazione dei guasti, ovvero la ricostruzione della locazione, tipologia e del profilo temporale del guasto. Le due strategie di calcolo del termine di compensazione nell'osservatore proposte sono comparate criticamente attraverso una campagna di esperimenti condotta su un manipolatore industriale a sei gradi di libertà.

### Modellistica

Il modello dinamico di manipolatore rigido ad  $n$  di libertà può essere scritto nella forma

$$M(q(t))\ddot{q}(t) + n(q(t), \dot{q}(t)) = \tau(t), \quad (1)$$

dove  $q$  e  $\tau$  denotano i vettori ( $n \times 1$ ) delle variabili di giunto e delle coppie ai giunti, rispettivamente. Nella equazione precedente  $M$  è la matrice d'inerzia di dimensioni ( $n \times n$ ), simmetrica e definita positiva,

$$n(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) + v(q, \dot{q})$$

è il vettore ( $n \times 1$ ) che include i termini di Coriolis e centrifughi ( $V(q, \dot{q})\dot{q}$ ), di attrito viscoso ( $F\dot{q}$ ) e gravitazionali ( $g(q)$ ), mentre il vettore  $v(q, \dot{q})$  raccoglie termini di difficile modellazione e/o disturbi (attrito alle basse velocità e disturbi elettromagnetici dovuti ai motori, ad esempio).

Si assume che sia disponibile solo un modello approssimato della struttura; in altre parole, si conoscono solo stime dei termini che compaiono nel modello matematico ( $\hat{M}(q)$ ,  $\hat{n}(q, \dot{q})$ ). Introducendo le quantità  $\tilde{M} = M - \hat{M}$  e  $\tilde{n} = n - \hat{n}$ , le equazioni del moto si riscrivono nella forma

$$M(q(t))\ddot{q}(t) + n(q(t), \dot{q}(t)) = \tau(t) - \delta(q(t), \dot{q}(t), \tau(t)), \quad (2)$$

dove le incertezze di modello sono tenute in conto dal termine

$$\delta(q(t), \dot{q}(t), \tau(t)) = \tilde{M}(q)(M(q)^{-1}(\tau(t) - n(q(t), \dot{q}(t)))) + \tilde{n}(q, \dot{q})$$

Una possibile scelta per le variabili di stato è data dal vettore ( $2n \times 1$ )

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Quindi, il modello del manipolatore può essere riscritto nella forma

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + h_c(x(t)) + B_c(x(t), u(t)) + \eta_c(x(t), u(t)) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

dove  $y$  denota il vettore ( $p \times 1$ ) delle uscite,  $u = \tau$  e  $C$  è la matrice ( $p \times 2n$ ) di uscita. Le matrici  $A_c$  e  $B_c$  sono definite come segue:

$$A_c = \begin{bmatrix} O_n & I_n \\ O_n & O_n \end{bmatrix}, \quad B_c(x) = \begin{bmatrix} O_n \\ M^{-1}(x_1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

dove  $O_n$  denota la matrice nulla ed  $I_n$  la matrice identità di dimensioni ( $n \times n$ ), rispettivamente. Infine, i termini di modello che rappresentano la parte non lineare della dinamica sono dati da:

$$h_c(x) = \begin{bmatrix} O_n \\ M^{-1}(x_1)n(x_1, x_2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\eta_c(x, u) = \begin{bmatrix} O_n \\ -M^{-1}(x_1)\delta(x_1, x_2, u) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

dove  $O_n$  denota il vettore nullo di dimensioni ( $n \times 1$ ). Se tutte le variabili di stato (posizione e velocità di ciascun giunto) sono misurabili si pone  $p=2n$  e  $C=I_{2n}$ .

Tipicamente, le misure delle uscite sono campionate con passo fisso  $T$ ; si assume anche che il sistema di controllo mantenga le coppie ai giunti costanti in ciascun intervallo di campionamento  $I_k = [kT, (k+1)T]$ , dove  $k \geq 0$  è una variabile intera. Applicando il ben noto metodo di Eulero, si può ricavare il semplice modello a tempo discreto:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + h(x(k)) + B(x(k), u(k)) + \eta(k, x(k), u(k)) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (8)$$

dove le variabili di tempo discreto  $kT$  e  $(k+1)T$  sono state indicate semplicemente dagli interi  $k$  e  $k+1$ , rispettivamente, le due quantità  $\rho_{d1}$ ,  $\rho_{d2}$  rappresentano gli errori locali dovuti alla discretizzazione del modello a tempo continuo e:

$$A = \begin{bmatrix} I_n & T I_n \\ O_n & I_n \end{bmatrix}, \quad h = T h_c, \quad B = T B_c, \quad \eta = T \eta_c + \begin{bmatrix} \rho_{d1} \\ \rho_{d2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Le caratteristiche del metodo di Eulero per l'integrazione numerica delle equazioni differenziali sono ben note: l'errore locale di discretizzazione ( $\rho_{d1}$ ,  $\rho_{d2}$ ) è dell'ordine di  $T^2$ , mentre l'errore accumulato è dello stesso ordine di grandezza di  $T$ . Si noti che in letteratura sono stati proposti altri modelli a tempo discreto per manipolatori robotici [17], caratterizzati, però, da una maggiore com-

plessità e meno adatti a risolvere problemi di dinamica diretta (valutazione dello stato del manipolatore al passo attuale dato lo stato e gli ingressi al passo precedente). Le classi di guasti considerate in questo lavoro sono, rispettivamente, quella dei guasti di attuatore e dei guasti di sensore.

La prima può essere definita come la classe di guasti che riguardano i motori ai giunti e/o i corrispondenti riduttori meccanici. Pertanto, i guasti di attuatore possono essere rappresentati come disturbi additivi sui riferimenti di coppia (coppie nominali),  $\bar{u}(k)$ , imposti agli azionamenti dei motori. In sintesi, un guasto di uno o più attuatori, all'istante  $t_k = kT$ , porterà ad un vettore di coppie ai giunti corrotte da guasto

$$u(k) = \bar{u}(k) + \delta u(k) \quad (10)$$

dove  $\delta u$  rappresenta l'effetto del guasto sulle coppie. Un guasto di sensore occorre quando le letture provenienti da uno o più sensori ai giunti (valori nominali delle variabili di stato), si discostano sensibilmente dai valori effettivi delle variabili di giunto. In definitiva, il vettore dei valori nominali delle variabili di stato ( $\bar{x}$ ) può essere espresso come somma del vettore dei valori effettivi ( $x$ ) e di un vettore  $\delta x$  che rappresenta l'effetto del guasto

$$\bar{x}(k) = x(k) + \delta x(k) \quad (11)$$

Assumendo misurabili sia le posizioni che le velocità dei giunti, il vettore rappresentativo del guasto assume la forma

$$\delta x(k) = \begin{bmatrix} \delta x_1(k) \\ \delta x_2(k) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

dove  $\delta x_1(k)$  e  $\delta x_2(k)$  sono indipendenti.

In definitiva, sostituendo le relazioni (10) e (11) nella (8), il modello dinamico assume la forma:

$$\bar{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + h(\bar{x}(k)) + B(\bar{x}(k))\bar{u}(k) + \eta(k) + f(k), \quad (13)$$

dove la dipendenza di  $f$  e  $\eta$  da  $x$  e  $u$  è stata omessa per compattare la notazione. Il vettore di guasto  $f$  rappresenta l'effetto dei guasti sulla dinamica del sistema, ed è dato da

$$f(k) = f_a(k) + f_s(k) + f_{as}(k),$$

dove:

$$f_a(k) = B(\bar{x}(k))\delta u(k), \quad (14)$$

$$f_s(k) = \delta x(k+1) - A\delta x(k) + \delta h(\bar{x}(k), \delta x(k)) + \delta B(\bar{x}(k), \delta x(k))\bar{u}(k), \quad (15)$$

$$f_{as}(k) = \delta B(\bar{x}(k), \delta x(k))\delta u(k), \quad (16)$$

e

$$\delta h(k) = h(x) - h(\bar{x}), \quad \delta B(\bar{x}, \delta x) = B(x) - B(\bar{x}).$$

Si noti che un guasto di attuatore influenza direttamente le ultime  $n$  componenti del vettore di guasto  $f$ , mentre un guasto di sensore, in generale, provoca una modifica di tutte le  $2n$  componenti.

### Un primo approccio alla diagnosi dei guasti

Una stima del vettore di guasto  $f(k)$  potrebbe essere ottenuta in maniera semplice definendo il seguente vettore di residui:

$$r(k+1) = \bar{x}(k+1) - A\bar{x}(k) - h(\bar{x}(k)) - B(\bar{x}(k))\bar{u}(k) \quad (17)$$

Dalla relazione (13) si riconosce facilmente che i residui sono direttamente influenzati dal termine di incertezza:

$$r(k+1) = \eta(k) + f(k). \quad (18)$$

Dunque, un guasto al passo  $k_f$  può essere rilevato ed isolato correttamente solo se il vettore delle incertezze è limitato ( $\|\eta(k, x, u)\| \leq \eta_M$  per ogni  $k, x$  e  $u$ ) e se esiste un  $k \geq k_f$  tale che  $\|f(k)\| > \eta_M$  (19), ovvero il vettore di guasto eccede, in norma, l'incertezza. Tuttavia, una buona stima di  $\eta_M$  spesso non è disponibile e/o il termine di incertezza non è limitato. Inoltre, la sensibilità ai guasti è influenzata direttamente dall'entità di  $\eta_M$ ; in altre parole, l'effetto di guasti di piccola entità potrebbe essere mascherato dal termine di incertezza.

### Diagnosi dei guasti basata su osservatore

I problemi legati al semplice approccio descritto nella Sezione precedente possono essere affrontati ricorrendo ad un osservatore diagnostico. L'obiettivo principale è quello di progettare un sistema capace di riprodurre il comportamento del manipolatore, a dispetto delle incertezze di modello e dei disturbi. La struttura generale dell'osservatore è la seguente:

$$x(k+1) = Ax(k) + h(\bar{x}(k)) + B(\bar{x}(k))\bar{u}(k) + K_o e(k) + \eta(k) \quad (20)$$

dove  $e = \bar{x} - \hat{x}$  è l'errore di stima dello stato, la matrice di guadagni  $K_o$  è data da

$$K_o = \begin{bmatrix} K_1 & T I_n \\ O_n & K_2 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

e  $K_1, K_2$  sono matrici ( $n \times n$ ) definite positive. Il termine  $\hat{\eta}(k)$  rappresenta una stima del vettore  $\eta(k)$  dei termini di incertezza di modello. Dunque, la dinamica dell'errore di stima è data da

$$e(k+1) = Fe(k) + \mathfrak{f}(k) + f(k), \quad (22)$$

dove  $F_i = I_n - K_i$  ( $i=1,2$ ),  $F = \text{blockdiag}\{F_1, F_2\}$  e  $\tilde{\eta}(k) = \eta(k) - \hat{\eta}(k)$

Il vettore dei residui viene scelto come segue:

$$r(k+1) = e(k+1) - Fe(k), \quad (23)$$

che può essere riscritto nella forma

$$r(k+1) = \mathfrak{f}(k) + f(k). \quad (24)$$

Si riconosce che, a differenza della (18), il vettore dei residui è influenzato, oltre che dal vettore di guasto, dall'errore di stima del termine di incertezza  $\eta(k)$  e non dalle incertezze. Quindi, se si dispone di una buona stima  $\hat{\eta}(k)$ , la firma dei guasti sui residui diviene più evidente. Nel seguito si presentano due tecniche differenti per il calcolo della stima  $\hat{\eta}(k)$  del termine di incertezza.

#### A) Guasti improvvisi: stima time-delayed

Il problema della stima del termine di incertezza nella equazione (13) può essere visto come un problema di stima dello stato con ingresso ignoto (unknown input observer) [18].

Infatti, tale stima può essere ottenuta ricorrendo ad valutazione ritardata nel tempo dei termini dinamici incerti del modello [13,14]. In sostanza, il termine  $\hat{\eta}(k)$  può essere calcolato come segue

$$\eta(k) = \bar{x}(k) - A\bar{x}(k-1) - h(\bar{x}(k-1)) - B(\bar{x}(k-1))\bar{u}(k-1) \quad (25)$$

ovvero

$$\eta(k) = \eta(k-1) + f(k-1). \quad (26)$$

Pertanto, la dinamica dell'errore di stima diventa

$$e(k+1) = Fe(k) + \eta(k) - \eta(k-1) + f(k) - f(k-1) \quad (27)$$

mentre il residuo è dato da

$$r(k+1) = \eta(k) - \eta(k-1) + f(k) - f(k-1) \quad (28)$$

A differenza della (17), l'effetto delle incertezze sui residui non dipende dall'entità di  $\hat{\eta}(k)$ , ma dalla sua differenza prima, e dunque dalla sua rapidità di variazione. Se  $\hat{\eta}(k)$  può essere assunto lentamente variabile, ovvero: la sua differenza prima è limitata superiormente da una costante  $\Delta\eta_M$

$$\|\eta(k) - \eta(k-1)\| < \Delta\eta_M,$$

per ogni  $k$ ,  $x$  e  $u$ , il limite superiore  $\Delta\eta_M$  è più piccolo di  $\eta_M$ :

$$\Delta\eta_M < \eta_M,$$

allora i residui saranno meno sensibili alle incertezze rispetto alla (17). Infatti, in tal caso, un guasto al passo  $k_f$  viene rilevato se esiste un  $k \geq k_f$  tale che

$$\|f(k) - f(k-1)\| > \Delta\eta_M \quad (29)$$

In definitiva, l'approccio time-delayed garantisce il corretto riconoscimento di guasti improvvisi, caratterizzati, cioè, dal fatto che la differenza prima di  $f(k)$  è limitata inferiormente dalla massima norma della differenza prima di  $\eta(k)$ ,  $\Delta\eta_M$ .

#### B) Guasti lentamente variabili: stima ricorsiva

Come è stato già sottolineato, la strategia di stima time-delayed non è in grado di rilevare guasti lentamente variabili, caratterizzati, cioè, dal fatto che il limite superiore della differenza prima di  $f$  è minore di  $\Delta\eta_M$ . Per superare questo problema, la stima del termine di incertezza può essere calcolata ricorsivamente:

$$\eta(k+1) = \eta(k) + \Gamma_\eta (e(k+1) - Fe(k)) \quad (30)$$

dove  $\Gamma_\eta$  è scelto in modo tale che  $I_{2n} - \Gamma_\eta$  possenga tutti autovalori di norma minore di 1. In questo caso, la dinamica dell'errore di stima è data da

$$\begin{cases} e(k+1) = Fe(k) + \mathfrak{f}(k) + f(k) \\ \mathfrak{f}(k+1) = (I_{2n} - \Gamma_\eta)\mathfrak{f}(k) + \eta(k+1) - \eta(k) - \Gamma_\eta f(k) \end{cases} \quad (31)$$

Dunque, tenendo conto della (24), il vettore dei residui è dato da

$$r(k+1) = (I_{2n} - \Gamma_\eta)r(k) + \eta(k) - \eta(k-1) + f(k) - f(k-1) \quad (32)$$

Si riconosce facilmente che il vettore dei residui è una versione filtrata di quello espresso dalla (28). Pertanto, selezionando opportunamente la matrice  $\Gamma_\eta$  lo schema proposto è in grado di rilevare correttamente guasti lentamente variabili.

### Effetto della ricostruzione numerica delle velocità

Se sono disponibili solo sensori di posizione dei giunti del manipolatore, le velocità possono essere ricostruite numericamente, ad esempio, come differenza prima delle posizioni misurate

$$z_2(k) = \frac{x_1(k) - x_1(k-1)}{T}, \quad (33)$$

dove la relazione con la derivata prima esatta può essere espressa come

$$x_2(k) = z_2(k) + \rho_{2z}(k-1)$$

e l'errore di discretizzazione  $\rho_{2z}(k-1)$  dipende dall'algoritmo di ricostruzione numerica adottato.

In questo caso il modello (8) può essere riscritto in termini delle velocità ricostruite numericamente, determinando così un nuovo modello a tempo discreto, simile a quello descritto dalla (8)

$$\begin{cases} z(k+1) = Az(k) + h(z(k)) + B(z(k))u(k) + \eta_z(k, z(k), u(k)) \\ y_z(k) = z(k) \end{cases} \quad (34)$$

dove

$$z(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix}, \quad z_1(k) = x_1(k), \quad (35)$$

e  $\eta_z$  è il termine di incertezza dipendente da  $\rho_{2z}$  e  $\eta$ . Pertanto, l'approccio basato sull'osservatore diagnostico può essere esteso a questo caso adottando il modello (34) in luogo del modello (8). È opportuno chiarire che il nuovo modello è scritto in termini di un nuovo insieme di variabili, in cui le velocità di giunto effettive sono sostituite dalla loro controparte numerica.

Tuttavia, questo non è da riguardare come un difetto del metodo esposto, in quanto il vero obiettivo di uno schema di FD non è la stima dello stato, ma la rilevazione, l'isolamento e l'identificazione dei guasti. Infine, è opportuno notare quando viene utilizzato il modello (34), il vettore di stato nominale è dato da

$$\bar{z}(k) = z(k) + \delta z(k), \quad (36)$$

dove

$$\delta z(k) = \begin{bmatrix} \delta z_1(k) \\ \delta z_2(k) \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$\delta z_1$  è il vettore dei guasti dei sensori di posizione, e

$$\delta z_2(k) = \frac{\delta z_1(k) - \delta z_1(k-1)}{T}. \quad (38)$$

Quindi, a differenza di quanto evidenziato dalla (12), le ultime  $n$  componenti di  $\delta z$  ( $\delta z_2$ ) non sono indipendenti dalle prime  $n$  ( $\delta z_1$ ). In altre parole, un guasto verificatosi sul sensore di posizione al giunto  $i$  si riflette non solo sulla  $i$ -esima componente di  $\delta z$  ma anche sulla componente  $i+n$ .

## Riconoscimento, isolamento e identificazione dei guasti

Ad ogni passo  $k$ , una volta generato il vettore dei residui  $r(k)$ , un guasto viene dichiarato se almeno una componente ( $i=1, \dots, n$ ) del vettore supera una soglia opportunamente fissata:

$$|r_i(k)| > \rho_i.$$

La selezione a priori di ciascuna soglia potrebbe partire dall'espressione analitica del vettore dei residui per stimare gli estremi inferiore e superiore di ciascuna componente. Tuttavia, un approccio di questo genere porta, in generale, a risultati estremamente conservativi. In alternativa, si può perseguire un approccio empirico. Infatti, facendo eseguire al manipolatore un insieme opportuno di traiettorie, è possibile calcolare l'andamento dei residui lungo tali traiettorie. Le soglie possono essere stabilite valutando il massimo valore assoluto di ciascuna componente del vettore dei residui. Se le traiettorie test sono scelte in modo da sollecitare al massimo la struttura, massimizzando l'entità dei residui, si può ritenere che le soglie così ottenute siano una stima affidabile, ma non eccessivamente restrittiva, dei valori estremi ottenibili per i residui. Tuttavia, una tale strategia non garantisce l'assenza di falsi allarmi e/o la mancata rilevazione di guasti di bassa intensità.

D'altra parte, uno schema completo di diagnosi dei guasti deve assicurare non solo una tempestiva ed affidabile rilevazione dei guasti, ma anche il loro isolamento, determinandone la localizzazione. Le espressioni del vettore dei residui (18), (28) e (32) mostrano chiaramente che le firme di guasto riflettono direttamente la struttura del vettore di guasto  $f(k)$ . In altre parole, si può affermare che un guasto dell' $i$ -esimo attuatore influenza principalmente la  $(n+i)$ -esima componente di  $r(k)$ , mentre un guasto del sensore  $i$ -esimo influenza la componente  $i$ -esima di  $r(k)$ , nonché la componente  $(n+i)$ -esima se si utilizza la ricostruzione numerica delle velocità (si vedano le (36)-(38)).

Dunque, a guasti distinti corrispondono a firme distinte sui residui: ciò implica che è possibile isolare in modo affidabile i guasti. Infine, è opportuno considerare il problema dell'identificazione del guasto rilevato ed isolato, ovvero la determinazione del suo profilo temporale.

Si comprende che un tale obiettivo presenta diverse difficoltà, in quanto è possibile stimare solo l'effetto combinato di guasti ed incertezze. Infatti, incertezze di modello e guasti influenzano la dinamica dell'errore di stima nello stesso modo. In altre parole, la stima del termine di incertezza sarà determinata da una combinazione di  $\eta$  e  $f$ .



Pertanto, la migliore stima del vettore di guasto può essere ottenuta solo come  $\hat{f}(k) = \hat{\eta}(k)$ . In sostanza, prima di rilevare un guasto (tutte le componenti di  $r(k)$  sono, in modulo, al di sotto delle soglie adottate),  $\hat{f}(k)$  è posto pari al vettore nullo; altrimenti, dopo la rilevazione di un guasto (alcune componenti di  $r(k)$  eccedono, in modulo, la soglia corrispondente), le corrispondenti componenti del vettore di guasto sono poste pari alle componenti omologhe di  $\hat{\eta}(k)$ . Quindi, dopo la rilevazione, il guasto può essere ricostruito come segue: la stima della  $i$ -esima componente di  $\delta x_1(k)$  è pari alla  $i$ -esima componente di  $x_{1d}(k) - e_1(k)$ , la stima della  $i$ -esima componente di  $\delta \tau(k)$  è pari alla  $i$ -esima componente di  $(M(q(k))/T) \hat{f}_2(k)$ , dove  $f_2$  è il vettore che raccoglie le ultime  $n$  componenti del vettore di guasto,  $x_{1d}$  è il vettore delle posizioni desiderate dei giunti ed  $e_1$  è vettore che raccoglie le prime  $n$  componenti dell'errore di stima dello stato.

### Risultati sperimentali

Le tecniche di generazione dei residui proposte sono state verificate sul robot industriale Comau Smart-3 S. Il manipolatore ha una struttura antropomorfa a sei gradi di mobilità, caratterizzata da offset di spalla e di gomito, e da un polso non sferico. I giunti sono attuati da motori brushless. Ca attraverso riduttori; resolver assoluti calettati sugli assi dei motori forniscono le misure di posizione angolare. Una versione aperta dell'unità di controllo, basata su Pc, permette di implementare algoritmi avanzati di controllo e diagnosi. Il modello dinamico del manipolatore è espresso in termini di un insieme minimo di parametri dinamici stimati sulla base di dati sperimentali [19]. Negli esperimenti si è adottato un algoritmo di controllo a dinamica inversa nello spazio dei giunti [20], implementato ad una frequenza di

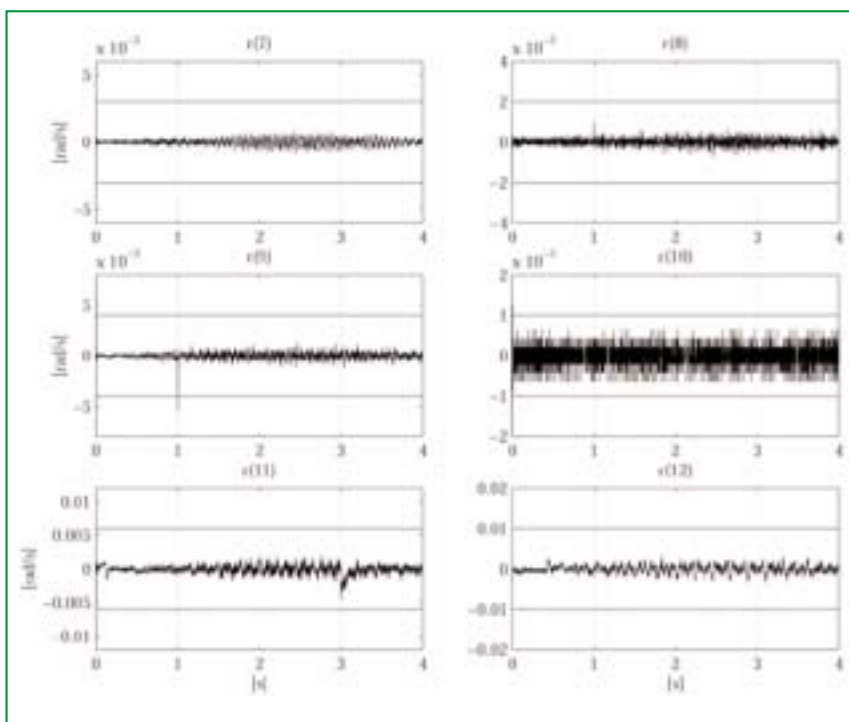


Figura 1 - Guasti di attuatore: residui ottenuti adottando la stima time-delayed

campionamento di 1.000 Hz. A ciascun giunto viene imposta una traiettoria polinomiale del quinto ordine con velocità ed accelerazioni iniziali e finali nulle; la configurazione iniziale è data da:

$$q_0^T = [\pi/2 \quad -2\pi/3 \quad \pi/6 \quad -\pi/2 \quad \pi/6 \quad 0],$$

mentre lo spiazzamento imposto è dato da

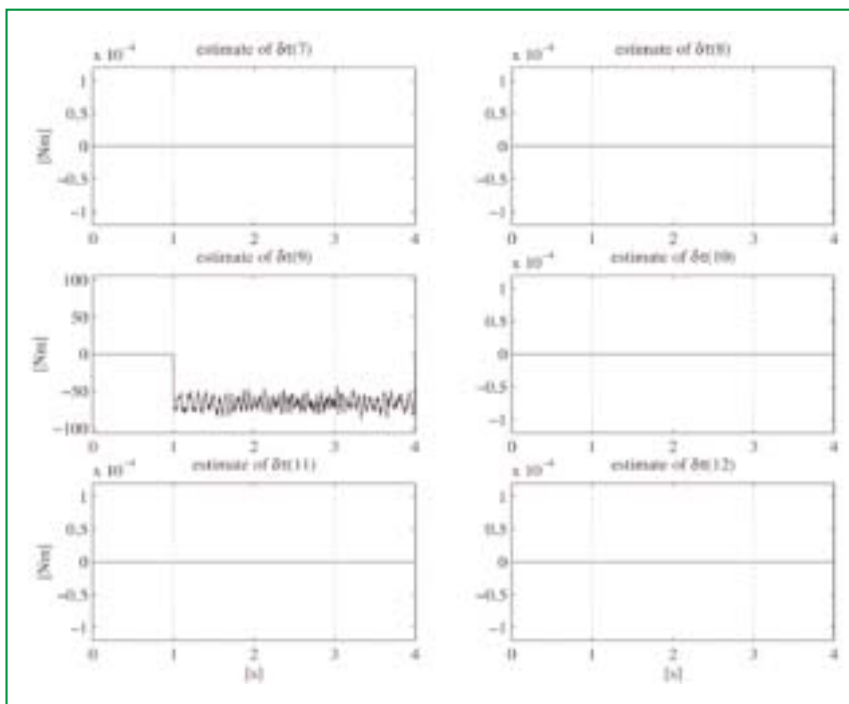


Figura 2 - Guasti di attuatore: identificazione ottenuta adottando la stima time-delayed

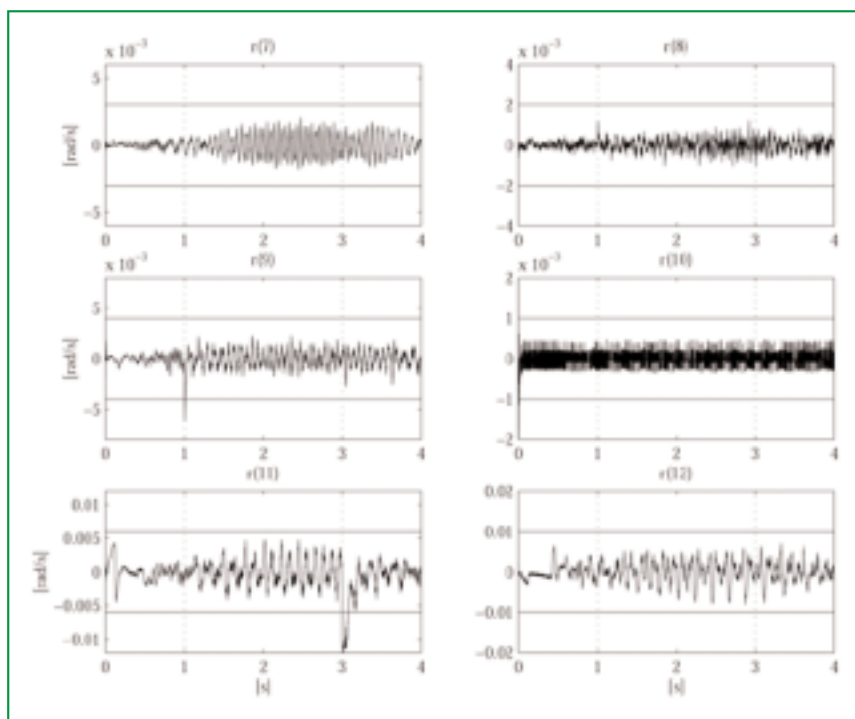


Figura 3 - Guasti di attuatore: residui ottenuti adottando la stima ricorsiva

$$\Delta q^T = [\pi/4 \quad \pi/4 \quad -\pi/4 \quad 0 \quad -\pi/2 \quad -\pi/2]$$

La durata programmata del moto imposto ai giunti è di 4 s. La traiettoria è stata eseguita dal manipolatore. Al fine di emulare la presenza dei guasti salvaguardando, allo stesso tempo, l'integrità dell'installazione sperimentale, ai dati sperimentali sono stati sovrapposte, fuori linea, i profili di

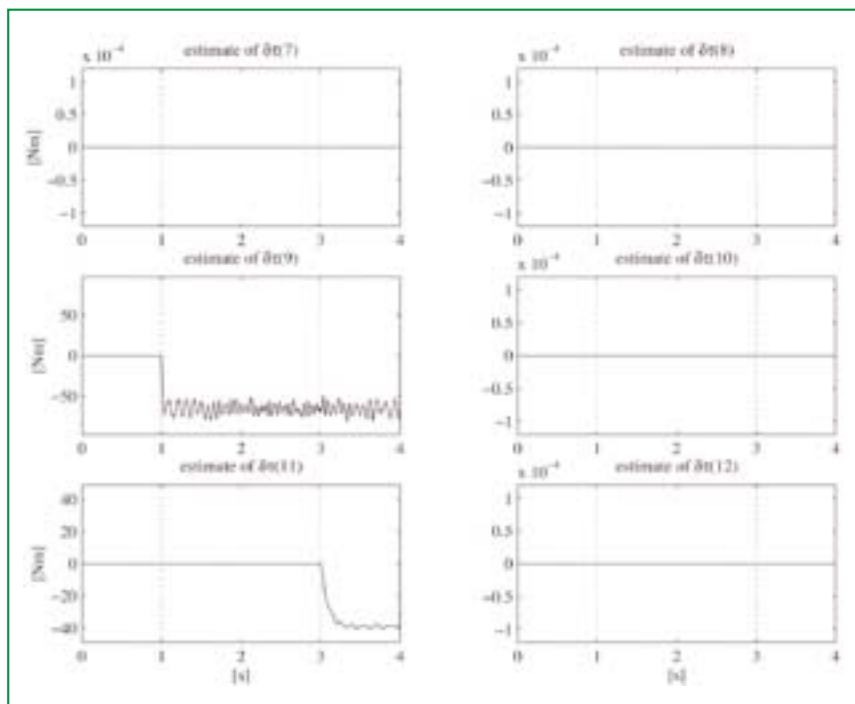


Figura 4 - Guasti di attuatore: identificazione ottenuta adottando la stima ricorsiva

guasto. In sostanza, le sequenze  $\delta\tau(k)$  e  $\delta x_1(k)$  sono semplicemente state aggiunte ai dati sperimentali rilevati in assenza di guasti. Dapprima, sono stati considerati due guasti di attuatore ai giunti 3 (a partire dal tempo  $t_{\text{guasto}}=1$  s) e 5 (a partire dal tempo  $t_{\text{guasto}}=3$  s), caratterizzati dalle seguenti leggi temporali:

$$\begin{cases} \delta\tau_3(k) = 60(1 - e^{-(kT-1)/0.002}) & kT \geq 1 \\ \delta\tau_5(k) = 40(1 - e^{-(kT-3)/0.08}) & kT \geq 3. \end{cases}$$

In un secondo caso di studio due guasti di sensore sono stati iniettati sulle misure delle posizioni ai giunti 3 ( $t_{\text{guasto}}=1$  s) e 5 ( $t_{\text{guasto}}=3$  s), caratterizzati dalle seguenti leggi temporali:

$$\begin{cases} \delta x_{1,3}(k) = 0.006(1 - e^{-(kT-1)/0.002}) & kT \geq 1 \\ \delta x_{1,5}(k) = 0.004(1 - e^{-(kT-3)/0.08}) & kT \geq 3. \end{cases}$$

È il caso di notare che il primo guasto, in entrambi i casi, è da considerarsi improvviso, mentre il secondo ha le caratteristiche di un guasto più lentamente variabile rispetto al primo.

L'osservatore diagnostico ed il calcolo del vettore dei residui è stato implementato ad una frequenza di 500 Hz ( $T=2$  ms). Le matrici di guadagno sono state scelte come  $K_1=K_2=0.1 \cdot I_3$

$$\Gamma_\eta = 0.1 \cdot \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2, 2, 2, 2, 2, 3\}$$

Al fine di effettuare una rilevazione affidabile dei guasti, si sono definite delle soglie opportune sui residui.

Le soglie sono state stabilite empiricamente, misurando i residui ottenuti per un insieme di traiettorie eseguite in assenza di guasti e sotto diverse condizioni operative; i loro valori numerici sono riportati di seguito:

$$\rho_1 = 3 \cdot 10^{-5}, \rho_2 = 2 \cdot 10^{-5}, \rho_3 = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_4 = 2 \cdot 10^{-5}, \rho_5 = 10^{-4}, \rho_6 = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\rho_7 = 3 \cdot 10^{-3}, \rho_8 = 2 \cdot 10^{-3}, \rho_9 = 2.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{10} = 10^{-3}, \rho_{11} = 5 \cdot 10^{-3}, \rho_{12} = 10^{-2}$$

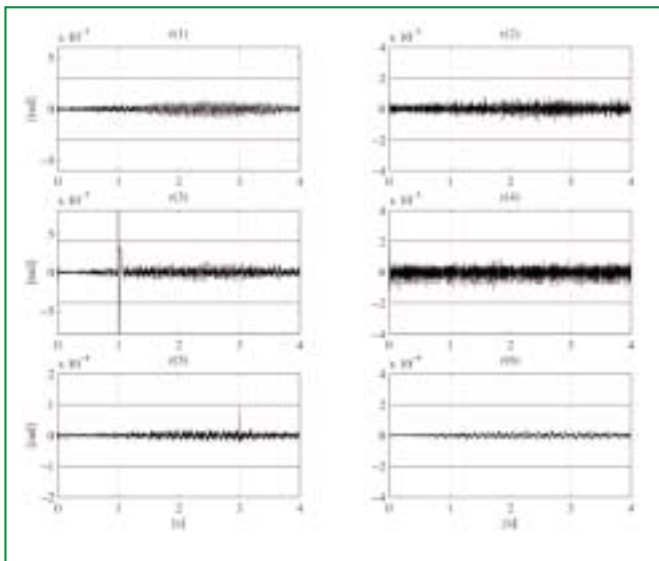


Figura 5 - Guasti di sensore: residui ottenuti adottando la stima time-delayed

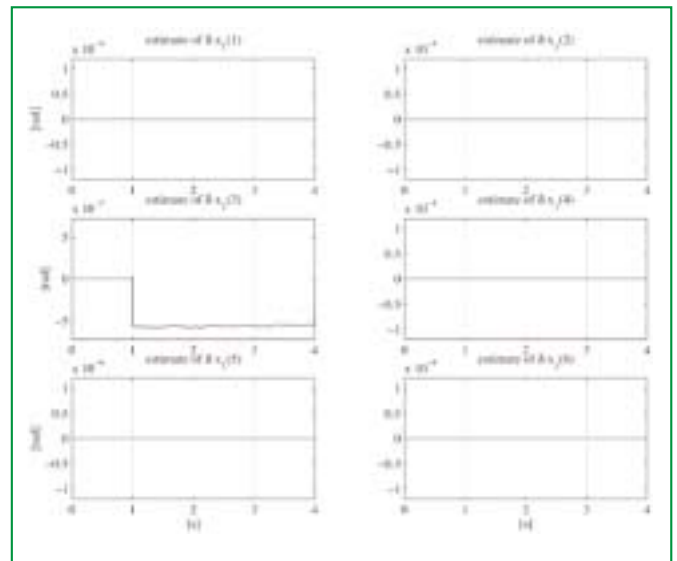


Figura 6 - Guasti di sensore: identificazione ottenuta adottando la stima time-delayed

Per i guasti di attuatore sono riportati solo gli andamenti delle ultime 6 componenti di  $r$ , poiché esse sono le uniche sensibili a questa classe di guasti. Le Figure 1-4 mostrano i risultati ottenuti per i guasti di attuatore emulati.

Come era prevedibile, l'adozione della stima time-delayed delle incertezze porta ad una minore sensibilità ai guasti lentamente variabili a fronte di residui sempre molto bassi (Figura 1). D'altra parte, lo schema di FD basato sulla stima ricorsiva delle incertezze rende lo schema di diagnosi più sensibile a guasti lentamente variabili, a fronte di residui con valori di picco più elevati (Figura 3). Le Figure 2 e 4 mostrano, infine, che è possibile anche pervenire ad una identificazione

soddisfacente dei guasti mediante le tecniche proposte. Per i guasti di attuatore sono riportati solo gli andamenti delle prime 6 componenti di  $r$ , poiché esse sono le uniche sensibili a questa classe di guasti. Le Figure 5-8 mostrano i risultati ottenuti per i guasti di sensore emulati. Ancora una volta, l'adozione della stima time-delayed delle incertezze porta ad una minore sensibilità ai guasti lentamente variabili a fronte di residui sempre molto bassi (Figura 5) rispetto allo schema di FD basato sulla stima ricorsiva delle incertezze (Figura 7). Le Figure 6 e 8 mostrano, infine, che anche nel caso di guasti dei sensori è possibile pervenire ad una identificazione soddisfacente dei guasti mediante le tecniche proposte.

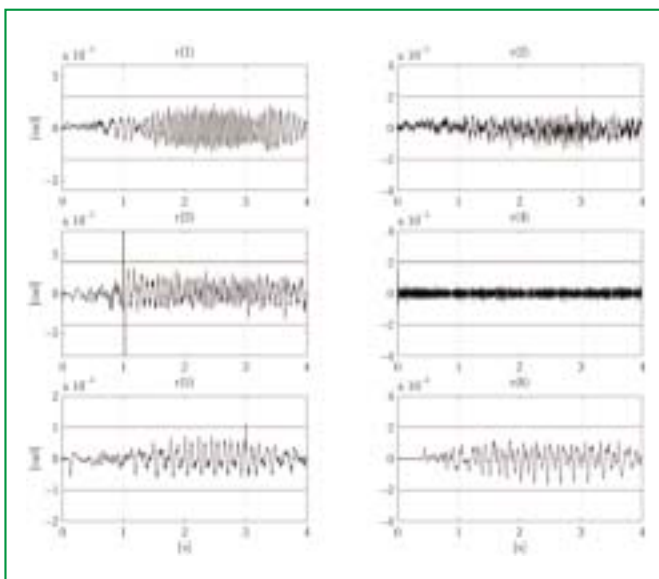


Figura 7 - Guasti di sensore: residui ottenuti adottando la stima ricorsiva

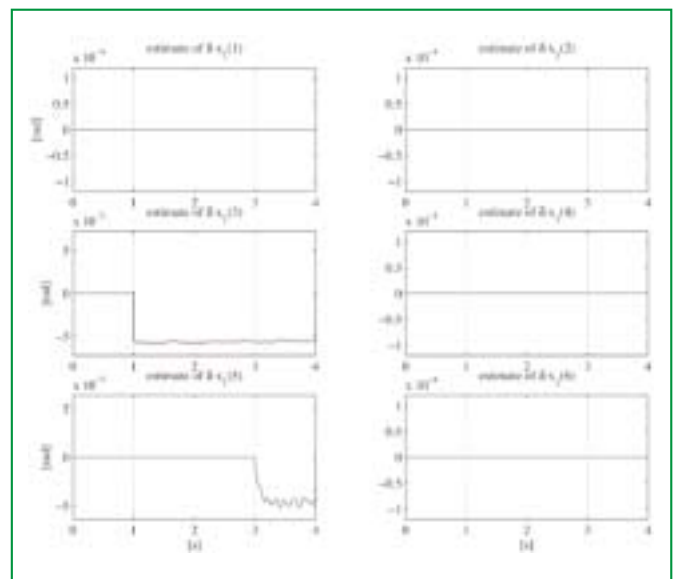


Figura 8 - Guasti di sensore: identificazione ottenuta adottando la stima ricorsiva



## Conclusioni e lavoro futuro

In questo lavoro è stato presentato un approccio alla FD per manipolatori robotici basato su osservatore diagnostico. Due diversi approcci alla stima dei termini incerti sono stati sviluppati e comparati criticamente mediante esperimenti su un robot industriale. Ulteriori sforzi di ricerca saranno focalizzati sull'adozione di tecniche adattative per la stima dell'incertezza, nonché sull'uso di tecniche di intelligenza artificiale (valutazione fuzzy dei residui, classificazione dei guasti mediante reti neurali) tese a migliorare le prestazioni dell'approccio proposto.

## Bibliografia

- [1] P.M. Frank, "Analytical and qualitative model-based fault diagnosis - A survey and some new results," *European Journal of Control*, vol. 2, pp. 6-28, 1996.
- [2] J. Gertler, *Fault detection and diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker Inc., New York, 1998.
- [3] M.A. Demetriou and M. M. Polycarpou, "Incipient fault diagnosis of dynamical systems using online approximators," *Ieee Transactions on Automatic Control*, vol. 43, pp. 1612-1617, 1998.
- [4] R.J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark, *Issues in fault diagnosis for dynamic systems*, Springer-Verlag, London, 2000.
- [5] R.J. Patton, F.J. Uppal and C.J. Lopez-Toribio, "Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems: A survey," *Preprints of the 4th Ifac Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, pp. 298-311, Budapest, H, 2000.
- [6] A.B. Trunov and M.M. Polycarpou, "Automated fault diagnosis in nonlinear multivariable systems using a learning methodology," *Ieee Transactions on Neural Networks*, vol. 11, pp. 91-101, 2000.
- [7] F. Caccavale and L. Villa-ni, *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances*, Springer-Verlag, London, 2002.
- [8] X. Zhang, M.M. Polycarpou and T. Parisini, "A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, pp. 576-593, 2002.
- [9] R. Isermann and B. Freyermuth, "Process fault diagnosis based on process model knowledge - Part I: Principles for fault diagnosis with parameter estimation," *Asme J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 620-626, 1991.
- [10] R. Isermann and B. Freyermuth, "Process fault diagnosis based on process model knowledge - Part II: Case study, experiments," *Asme J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 627-633, 1991.
- [11] H. Schneider and P.M. Frank, "Observer-based supervision and fault detection in robots using nonlinear and fuzzy logic residual evaluation," *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, pp. 274-282, 1996.
- [12] A.T. Vemuri, M.M. Polycarpou and S. A. Diakourti, "Neural network based fault detection in robotic manipulators," *Ieee Transactions on Automatic Control*, vol. 14, pp. 342-348, 1998.
- [13] F. Caccavale and I.D. Walker, "Observer-based fault detection for robot manipulators", *Proceedings of the 1997 Ieee International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2881-2887, Albuquerque, NM, 1997.
- [14] F. Caccavale, "Experiments of Observer-based Fault Detection for an Industrial Robot," *Proceedings of the 1998 Ieee International Conference on Control Applications*, pp. 480-484, Trieste, I, 1998.
- [15] M.L. Visinsky, J.R. Cavallaro, and I.D. Walker, "A dynamic fault tolerance framework for remote robots," *Ieee Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, pp. 477-490, 1995.
- [16] W.E. Dixon, I.D. Walker, D.M. Dawson and J.P. Hartranft, "Fault detection for robot manipulators with parametric uncertainty: a prediction-error-based approach," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, pp. 689 -699, 2000.
- [17] C.P. Neumann and V.D. Tourassis, "Discrete dynamic robot models," *Ieee Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* vol. 15, pp. 193-204, 1985.
- [18] R.H.C. Takahashi and P.L.D. Peres, "Unknown input observers for uncertain systems: A unifying approach," *European Journal of Control*, vol. 5, pp. 261-275, 1999.
- [19] G. Antonelli, F. Caccavale and P. Chiacchio, "A systematic procedure for the identification of dynamic parameters of robot manipulators," *Robotica*, vol. 17, pp. 427-435, 1999.
- [20] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag, London, 2000.

**Ringraziamenti:** Si ringrazia il supporto finanziario dell'Agenzia Spaziale Italiana e del Miur.

F. Caccavale, Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata, caccavale@unibas.it. L. Villani, Dip. di Informatica e Sistemistica, Univ. degli Studi di Napoli Federico II, luigi.villani@unina.it