

# Il controllo che apprende

La sperimentazione effettuata dall'Università di Brescia dimostra la validità applicativa della metodologia ILC (Iterative Learning Control) attraverso la quale migliorare l'efficienza dei sistemi di controllo con uno sforzo progettuale del tutto accettabile

MATTEO MARINO

**L**a metodologia ILC (Iterative Learning Control) catalizza da anni l'attenzione degli specialisti della ricerca e sviluppo nel settore del controllo del moto dei sistemi robotizzati di tutto il mondo. La teoria alla base di tale modello è consolidata e possiede una struttura in grado di accrescere l'efficienza dei sistemi soprattutto nell'ambito dei servomeccanismi.

La tecnica non ha ancora trovato, però, un effettivo riscontro applicativo e le ragioni sono sia di carattere tecnico sia da ricercarsi nel rapporto ottenibile costo su prestazioni.

La tecnica ILC può riservare alcune difficoltà che possono coinvolgere sia le scelte degli algoritmi ideali sia la taratura dei parametri addizionali oltre determinare una non sempre agevole valutazione dei reali benefici derivanti dalla sua applicazione pratica per ciò che concerne la quantificazione esatta della fase di apprendimento e la determinazione quantitativa della riduzione dell'errore di inseguimento della traiettoria. Grazie al lavoro dei ricercatori del Dipartimento di Elettronica per l'Automazione e del Dipartimento di Meccanica dell'Università di Brescia è stato possibile raccogliere le informazioni necessarie per approfondire la teoria alla base della metodologia ILC svizzerando, attraverso un'applicazione di laboratorio, i benefici della tecnica.

## Iterative Learning Control

In ogni sistema controllato in condizioni operative stabili possono presentarsi i medesimi errori a ogni ciclo di lavoro se il controllore che li governa è fissato. Tale assunto è alla base della metodologia Iterative Learning Control che memorizza la portata degli errori in RT (Real Time) al termine di ogni iterazione determinando successivamente il

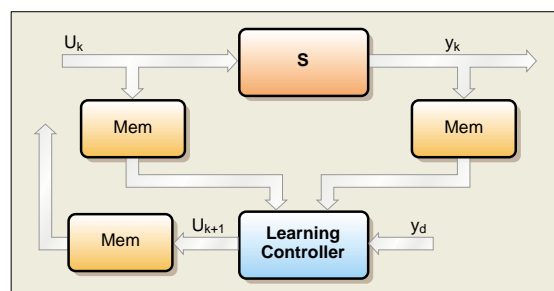
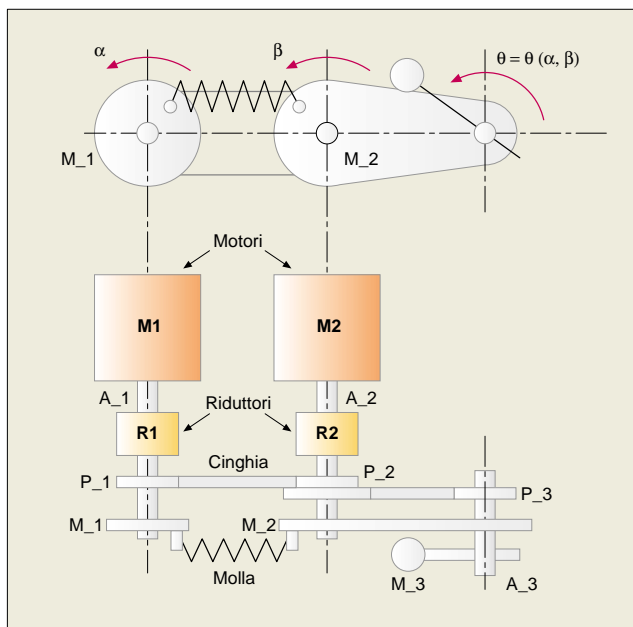


Fig. 1 - Schema di un modello ILC in cui compare il sistema S, solitamente formato da uno schema in retroazione con controllo tradizionale PID, il segnale ( $U_k$ ) di ingresso nel sistema al ciclo k-esimo, il segnale ( $Y_k$ ) di uscita dal sistema al ciclo k-esimo, i sistemi (Mem) di memorizzazione dei segnali e il sistema di apprendimento e controllo (Learning Controller)

valore esatto da attribuire al segnale di ingresso e riducendo ciclicamente il modulo dell'errore di inseguimento. La tecnica di correzione dell'errore del segnale in ingresso al sistema attraverso il metodo di autoapprendimento è applicabile solo in condizioni di assoluta ciclicità delle



**Fig. 2 - Principio di funzionamento del banco prova ILC allestito nel Laboratorio di Meccanica Applicata e Robotica dell'Università di Brescia**

operazioni e quindi su tutti gli apparati che compiono iteratamente le stesse fasi di lavoro. L'approccio utilizzato dell'Iterative Learning Control ha carattere di autoapprendimento calcolando, mediante algoritmi idonei, l'esatto apporto correttivo grazie all'acquisizione delle informazioni dei cicli precedenti fino a raggiungere il valore di accuratezza desiderato in funzione degli specifici scopi e utilizzi. L'approccio della metodologia, approfondito in seno ai laboratori di Meccanica ed Elettronica per l'Automazione dell'Università di Brescia, è completamente differente rispetto alle tecniche classiche del controllo e non necessita una conoscenza approfondita del sistema in uso. Attraverso la figura 1 è possibile apprendere il principio di funzionamento dell'algoritmo utilizzato dalla tecnica ILC che coinvolge l'apparato Iterative Learning Control Feedback System costituito dal sistema da controllare o dall'insieme del medesimo sistema con il relativo dispositivo di controllo in retroazione e il Learning Controller. Un settore tipicamente coinvolto da tale tipo di circuito di controllo è quello della robotica con automazione ripetitiva i cui domini sono sia nel tempo sia nel numero di cicli. La memorizzazione dei segnali di ingresso e di uscita a ogni iterazione del ciclo ( $u_k(t)$  e  $y_k(t)$ ) consente di effettuare il calcolo esatto dell'errore imputato al ciclo ( $k$ ) e la successiva attribuzione del valore adeguato del segnale di ingresso del successivo ciclo

( $k+1$ ) per la riduzione del segnale di inseguimento. Lo schema di figura 1 pone in evidenza il sistema  $S$  che, solitamente formato da uno schema in retroazione con controllo tradizionali PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo), è affiancato dal Learning Controller attraverso cui determina la funzione di riferimento ottimale per la produzione della traiettoria in uscita conforme alle specifiche necessità applicative. La componente di apprendimento della tecnica fornisce la soluzione per ridurre l'errore di inseguimento attraverso l'iterazione di un numero di cicli sufficiente ed è in grado di produrre l'esatta funzione minimizzante. La taratura dei dispositivi può, inoltre, essere compiuta senza particolare accortezza dagli operatori data la capacità di auto-bilanciamento del sistema a discapito di una produzione contabilizzata di scarto fino al raggiungimento dell'accuratezza necessaria. Da questa prima affermazione risulta chiaro il trade off esistente tra lo sforzo progettuale di un idoneo complesso di controllo in autoapprendimento ILC e il valore dello scarto produttivo contemplato dalla tecnica di controllo. L'impostazione dei complessi algoritmi ILC e la conseguente articolazione della tecnica deve essere confrontata, inoltre, con il reale beneficio ottenibile sia in termini qualitativi sia in termini temporali. Le tradizionali tecniche di controllo in retroazione non necessitano, infatti, di alcun periodo di apprendimento anche se incapaci di minimizzare autonomamente l'errore di inseguimento.

## Le prove sperimentali

Le prove sperimentali effettuate su un banco prova nel Laboratorio di Meccanica Applicata e Robotica dell'Università di Brescia sono basate su un dispositivo la cui dinamica è analoga a quella di un sistema Scara a due gradi di libertà e il cui end-effector virtuale è determinato dal centro della massa a sbalzo.

La modalità di funzionamento del sistema può essere acquisita attraverso lo schema di figura 2 in cui il motoriduttore  $M1+R1$  movimentata, tramite l'albero  $A1$ , la puleggia  $P1$  e il volano  $M1$ , mentre il motoriduttore  $M2+R2$  movimentata, tramite l'albero  $A2$ , il volano eccentrico  $M2$ . La puleggia  $P1$  trasferisce il movimento del motore  $M1$  alla massa  $M3$  tramite la puleggia  $P2$  che risulta folle sull'albero  $A2$ , mentre la puleggia  $P3$  è solidale all'albero  $A3$  libero, a sua volta, di ruotare sul volano eccentrico  $M3$ . I due volani  $M1$  e  $M2$  sono collegati da una molla con costante elastica predefinita ( $K$ ).

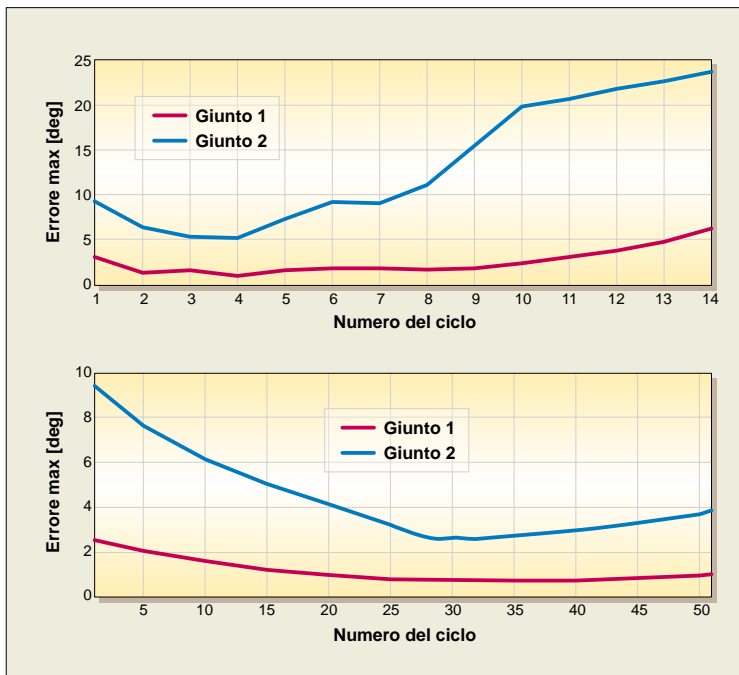
Il volano 3 è costituito da una massa a sbalzo e da un elemento circolare alleggerito, definito volano massa a sbalzo. L'applicazione a banco è coadiuvata da un sistema di controllo XNC la cui routine di controllo è stata aperta per effettuare le modifiche specifiche per la sperimentazione del modello ILC. Nell'applicazione del modello Iterative Learning Control, inoltre, non è necessario lo studio del

modello dinamico del sistema in uso facilitando complessivamente l'esercizio. L'intervallo di campionamento scelto è pari a 1 ms e la sperimentazione ha reso necessaria la scelta di una traiettoria in grado di ricoprire quasi tutta l'area di lavoro affinché si sollecitasse al massimo la dinamica complessiva del sistema edificato. I ricercatori del laboratorio hanno reso indipendente il controllo dei due giunti attraverso una legge di tipo decentralizzato con un controllore PID con taratura non accurata per verificare le potenzialità effettive dell'apprendimento dell'errore e della sua correzione da parte del modello di riferimento. Il segnale di riferimento per l'anello di controllo per

$$u_{k+1}^i(t) = Qi(z)\{u_k^i(t) + L_i(z)e_k^i(t)\} \quad i = 1, 2.$$

**Fig. 3 - Legge discreta ILC che modifica iteratamente il segnale di riferimento per l'anello di controllo di ogni singolo giunto**

ogni giunto è modificato a ogni iterazione da una legge di tipo discreto esplicitata in figura 3 in cui  $z$  è l'operatore di ritardo unitario,  $u_k^i$  è il segnale di riferimento per il sistema di controllo del giunto  $i$ -esimo all'iterazione  $k$ -esima,  $e_k^i(t)$  è la differenza tra la posizione desiderata e la posizione del giunto  $i$ -esimo all'istante  $t$  all'iterazione  $k$ -esima. Le grandezze  $Q_i(z)$  e  $L_i(z)$  sono, infine, le funzioni di trasferimento di filtri opportuni differenti per i due giunti utilizzati.



**Fig. 4 - Errore di inseguimento della traiettoria per valori della costante elastica rispettivamente di 0,5 e 0,05 in cui si evidenzia il numero di cicli per i quali si ottiene il massimo dell'efficienza**

## Legge proporzionale

L'applicazione di una semplice legge proporzionale (con  $Q_i(z)=1$  e  $L_i(z)=K$ ) uguale per i due giunti ha dimostrato che, applicando differenti valori della costante elastica, le prestazioni dei primi cicli migliorano manifestando un netto peggioramento in presenza un numero di iterazioni elevato (figura 4). Al variare della costante elastica della molla di sistema l'andamento non subisce alterazioni particolari manifestando, infatti, il medesimo trend. Dai numerosi e differenti esercizi di laboratorio è emerso che l'applicazione di leggi proporzionali semplici a limitato impatto progettuale determinano risultati sufficientemente evidenti da confermare un comportamento del simulatore Scara invariante rispetto al variare del parametro costante elastica ( $K$ ). L'applicazione ha, inoltre, permesso di verificare un aumento netto delle prestazioni dopo poche iterazioni (4 con  $K=0,5$ ; 30 con  $K=0,05$ ) e una instabilizzazione generale all'aumentare dei cicli successivamente al raggiungimento dei valori massimi di efficienza. L'utilizzo adeguato dei filtri  $L(z)$  e  $Q(z)$  può migliorare ulteriormente le prestazioni del sistema a discapito di un ulteriore impegno progettuale che può, in alcuni casi, non giustificare il prezzo dell'applicazione Iterative Learning Control anche se i ricercatori sono concordi nell'affermare che l'applicazione di semplici leggi proporzionali al modello ha fatto ampiamente emergere la bontà della metodologia di controllo a patto di interpretare sapientemente il limite del miglioramento dell'efficienza senza destabilizzare il sistema con iterazioni troppo elevate. Lo sforzo di taratura, inoltre, è sufficientemente

ridotto in confronto ai risultati ottenibili. Nel caso in cui la legge di controllo preveda l'utilizzo di filtri è, altresì, confermata la accuratezza del metodo attraverso lo sfruttamento di procedure euristiche adeguate per evidenziare l'apice di efficienza. Tale ultima considerazione richiama all'attenzione il riferimento al trade off iniziale per cui è sempre e in ogni caso importante valutare se lo sforzo progettuale e il tempo necessario per riscontrare il tetto di efficienza siano compensati dal miglioramento dell'efficienza complessiva ottenibile in virtù delle applicazioni a carattere ciclico a cui il modello Iterative Learning Control può essere applicato. I ricercatori dell'Università di Brescia confermano, inoltre, che nonostante l'esperimento riportato faccia riferimento a un robot a soli due gradi di libertà con determinate caratteristiche elettromeccaniche, tutte le considerazioni espresse possono essere estese a un generico robot industriale per valutare l'applicabilità della strategia ILC. ■