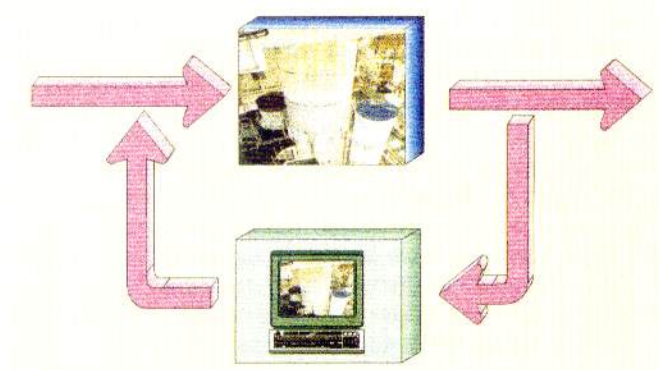
Filtraggio predittivo del riferimento

per il controllo di sistemi vincolati

di Alberto Bemporad e Edoardo Mosca

Viene affrontato il problema del controllo di impianti soggetti a vincoli sulle variabili di stato o di ingresso. Viene presentata una nuova metodologia di tipo predittivo che, mediante il filtraggio della traiettoria di riferimento, consente di ottenere il rispetto dei vincoli, stabilità e buone prestazioni in termini di inseguimento con una complessità computazionale molto contenuta, implementabile con hardware a basso costo.



Il controllo predittivo (CP) probabilmente è l'approccio più importante per il controllo avanzato di processi industriali complessi. A differenza di molte altre moderne tecniche di controllo, permette di gestire in tempo reale vincoli sullo stato e sugli attuatori, consentendo un utilizzo dell'impianto nelle condizioni di massima produttività.

Il CP raccoglie al suo interno un'ampia varietà di metodologie, e questa ricchezza di scelte permette al progettista di configurare un algoritmo di controllo adatto alla specifica applicazione, sia essa una macchina utensile, un processo chimico o un ecosistema.

Il concetto di controllo predittivo fu introdotto contemporaneamente da [5] e da [19] alla fine degli anni Settanta. Da allora molto lavoro è stato svolto sull'argomento (vedi riferimenti bibliografici), non solo sul piano teorico e simulativo, ma anche nel settore delle applicazioni a processi industriali. In tale ambito il CP ha riscosso notevole successo nell'industria petrolchimica. I CP sono basati su una predizione del comportamento futuro del processo da controllare. Per effettuare tale predizione, è necessario disporre di un modello di tale processo. È questo il motivo per il quale spesso si parla di *controllo predittivo basato sul modello (Mbpc, Model Based Predictive Control)*.

Questa necessità tuttavia non limita l'applicabilità soltanto a sistemi strutturalmente semplici. Si è visto infatti che i CP possiedono una notevole robustezza nei confronti delle incertezze parametriche, e pertanto possono essere applicati con successo ad impianti anche molto complessi. Si è inoltre notato che la sintonizzazione dei parametri dei CP risulta

Ing. A. Bemporad, prof. E. Mosca, Dipartimento di Sistemi e Informatica, Università di Firenze.

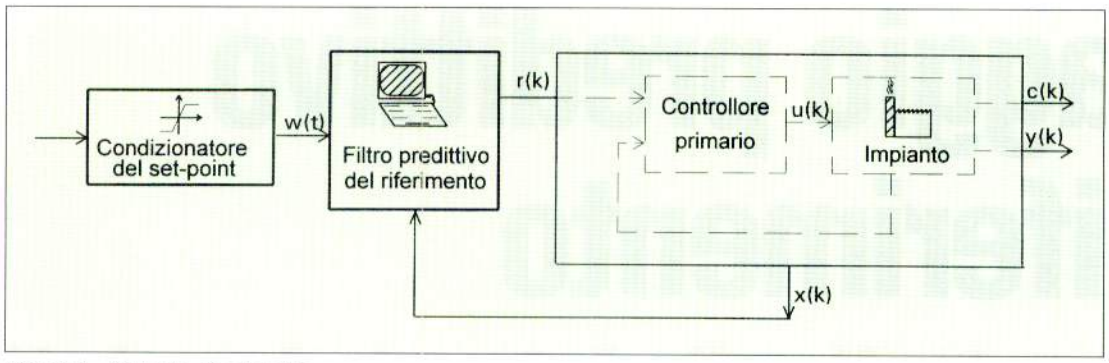


Figura 1 - Schema di controllo

facile anche senza una specifica competenza in materia di controlli. Rispetto al CP, il *controllo lineare quadratico (LQ)* è valido soltanto per sistemi linearizzati, non è in grado di tenere conto di eventuali vincoli e, inoltre, spesso, risulta difficile raggiungere le specifiche di progetto agendo unicamente sul funzionale di costo che definisce la legge LQ. Questi stessi problemi vengono accusati, in maniera forse maggiore, dalle tecniche tradizionali di *posizionamento dei poli e di sintesi per tentativi.*

Nelle applicazioni in cui si ha a che fare con impianti tempo-varianti la *tecnica del controllo adattativo* dà spesso ottimi risultati, non ottenibili con controllori a parametri fissi. Tale metodologia prevede che venga identificato in linea un modello dell'impianto in funzione del quale vengono aggiornati i parametri del controllore, che pertanto diventa tempo-variante. Si è visto che il CP si presta molto bene ad essere adoperato in modo adattativo.

Controllo predittivo

Cosa intendiamo per predittivo? Immaginiamo che il controllore si comporti come un giocatore di scacchi. Questi effettua la propria mossa solo dopo aver pensato a quali mosse potrebbero susseguirsi successivamente, elaborando quindi un piano strategico.

Il giocatore poi, nel prosieguo della partita, non applicherà necessariamente tutta la sequenza di mosse che aveva ideato, ma ripeterà ogni volta il processo mentale di predizione. Il CP non è altro che un controllore a tempo discreto che agisce con un logica di questo tipo. Possiamo paragonare il vettore di stato del sistema alla configurazione attuale della scacchiera (ogni pezzo equivale ad una componente dello stato), l'ingresso di comando alla mossa eseguita e osservare che, così come il giocatore deve tenere conto del fatto che i pezzi della scacchiera sono soggetti a dei vincoli (ad esempio l'alfiere si può muovere soltanto in diagonale), sulle variabili di sistema (ingresso e stato) possono essere presenti delle limitazioni quali ad esempio la saturazione degli attuatori. Chiamiamo u(t) l'ingresso, y(t) l'uscita, x(t) lo stato e w(t) l'uscita desiderata all'istante di campionamento t. Indichiamo con w(t+k) i valori futuri (effettivi o interpolati) di questa traiettoria e con y(t+k|t) la stima dell'evoluzione dell'uscita sull'orizzonte di predizione effettuata sulla base delle informazioni disponibili all'istante t.

Il CP calcola una sequenza di ingressi u(t+k) tale che l'evoluzione y(t+k|t) sia il più possibile vicina alla traiettoria w(t+k) e che i vincoli siano rispettati.

Di questa sequenza, soltanto il primo valore, u(t), viene effettivamente applicato agli attuatori. Al passo successivo, l'intera operazione viene ripetuta nuovamente per calcolare u(t+1). Questo tipo di approccio in letteratura è detto a *orizzonte recessivo (receding horizon).*

Come quantificare il concetto di "inseguire bene" la traiettoria desiderata? Definiamo un indice di prestazione

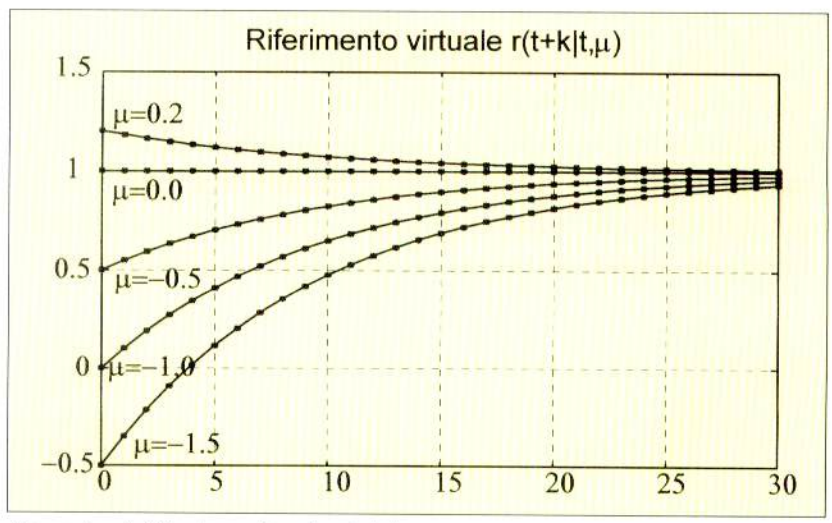


Figura 2 - r(t+k|t, μ) per diversi valori di μ

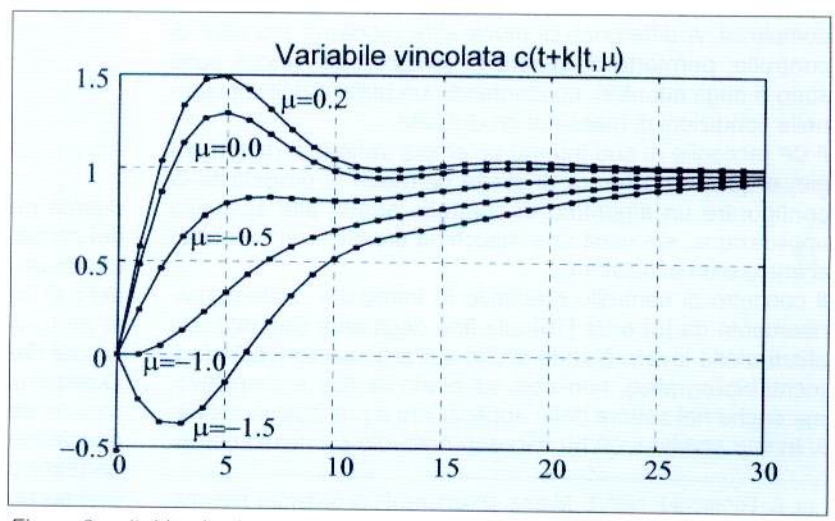


Figura 3 - c(t+k|t, μ) relativa ai riferimenti di Figura 2

$$\sum_{k=0}^{N}\left[y(t+k|t)-w(t+k)\right]^2$$

e definiamo come ottima la sequenza degli u(t+k) che lo minimizza. A parte il caso in cui la soluzione è esprimibile in forma analitica (modello lineare e assenza di vincoli), questa operazione di ottimizzazione richiede una procedura iterativa, tanto più onerosa dal punto di vista computazionale quanto più complesso è il modello dell'impianto e più lungo è l'orizzonte di predizione.

Per quanto riguarda i risultati di stabilità, [10] hanno dimostrato che, in ipotesi di esistenza della soluzione, ogni controllore a orizzonte recessivo su orizzonte infinito ($N = \infty$) è stabilizzante. In caso di orizzonte finito, la condizione di stato terminale nullo x(N)=0 assicura ancora la proprietà di stabilità, anche se pone problemi di risolubilità della procedura di minimizzazione.

Recentemente [18] hanno ottenuto risultati di stabilità per impianti stabili ad anello aperto e con integratori definendo l'indice di costo su orizzonte infinito, ma supponendo che la sequenza degli ingressi si mantenga costante dopo un numero finito di passi, il che rende la procedura di minimizzazione implementabile.

Un altro approccio, individuato da [2], consiste nel parametrizzare sull'orizzonte di predizione la successione del riferimento da inseguire per mezzo di uno scalare, e quindi effettuare la minimizzazione rispetto a tale parametro. Con questo tipo di filosofia, si ottengono ottimi risultati di stabilità, esistenza della soluzione, prestazione in termini di inseguimento e al tempo stesso un carico computazionale molto ridotto. Si descriverà questo tipo di approccio nella parte sucessiva dell'articolo. Un risultato comparabile è stato ottenuto recentemente anche da [7].

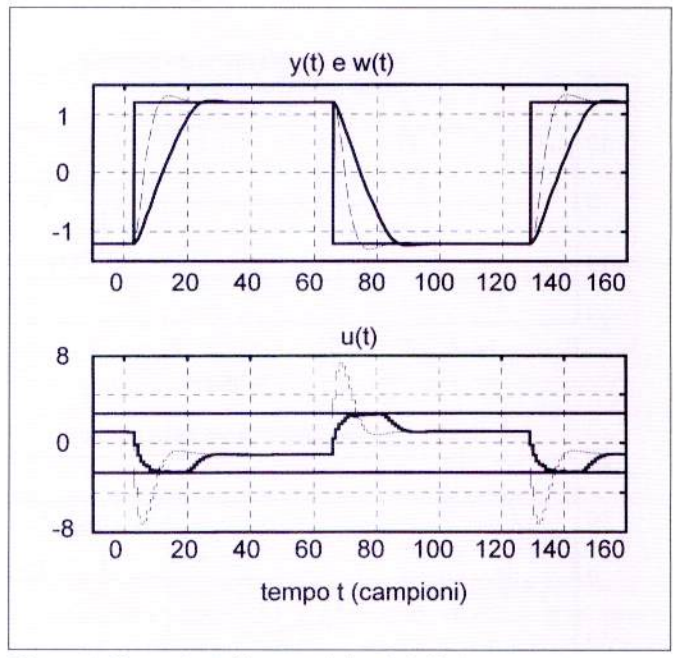


Figura 4 - Esempio 1: filtro predittivo del riferimento attivato (linea continua) e in assenza di vincoli (linea tratteggiata)

Riferimenti virtuali

Consideriamo lo schema di controllo rappresentato in Figura 1, dove con c(t) si indica la grandezza di sistema sulla quale vengono imposti dei vincoli. Si supponga che precedentemente sia stato progettato per l'impianto un *controllore primario* in maniera tale che, oltre ad assicurare la stabilità del sistema complessivo, in assenza di vincoli si abbiano buone proprietà di inseguimento del riferimento *r* e un guadagno in continua da *r* a *y* unitario.

Sebbene la filosofia qui descritta sia applicabile in linea di principio anche a sistemi non lineari, si supporrà che il sistema ad anello chiuso sia lineare.

Nel seguito si distinguerà il riferimento r(t) dato al controllore primario dalla traiettoria di set-point w(t) che si vorrebbe essere inseguita dall'uscita y(t). Si indichi con il termine *filtro predittivo del riferimento (Fpr)* il dispositivo che trasforma r(t) in w(t). Ci si propone qui di studiare una logica di funzionamento del Fpr tale da assicurare che la variabile c(t) resti sempre entro i vincoli prestabiliti. Sostanzialmente si desidera che il Fpr svolga una operazione di smussamento della traiettoria w(t) allorquando variazioni troppo brusche causerebbero una violazione dei vincoli.

Questo obiettivo può essere raggiunto mediante una strategia di tipo predittivo. Si supponga allora che ad ogni istante di campionamento *t* il Fpr generi un *riferimento virtuale* r(t+ ilt), i=0, 1, ...,∞ , tale che, sull'orizzonte di predizione, dia luogo ad una evoluzione ammissibile della variabile c(t), cioè che rispetta i vincoli imposti e che per i->∞ tenda al valore desiderato w(t). Quest'ultima condizione impone che w(t) venga limitato da un condizionatore di set-point in ma-

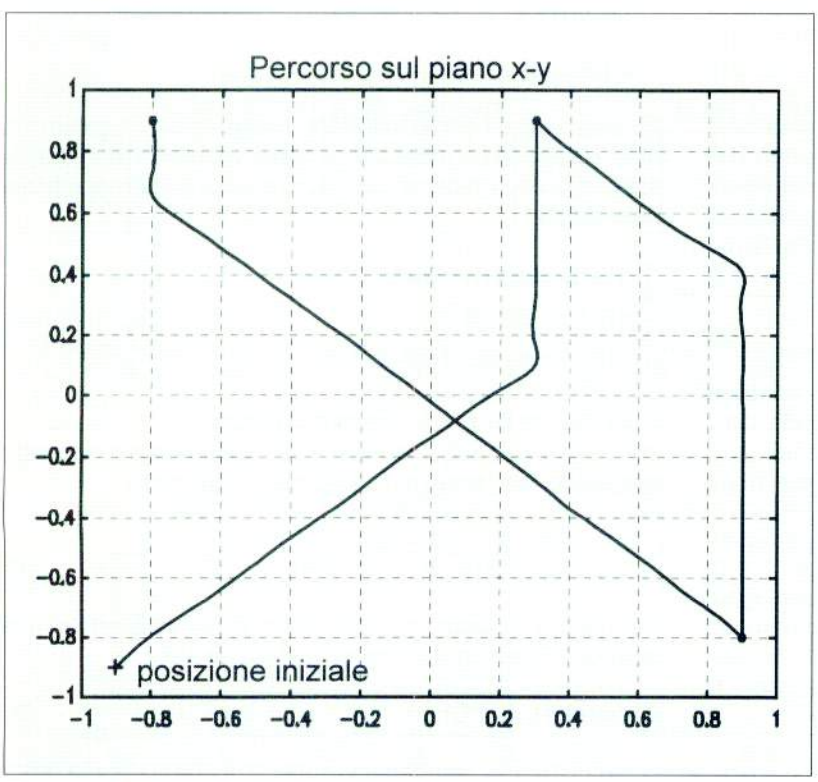


Figura 5 - Traiettoria dell'utensile sul piano x-y

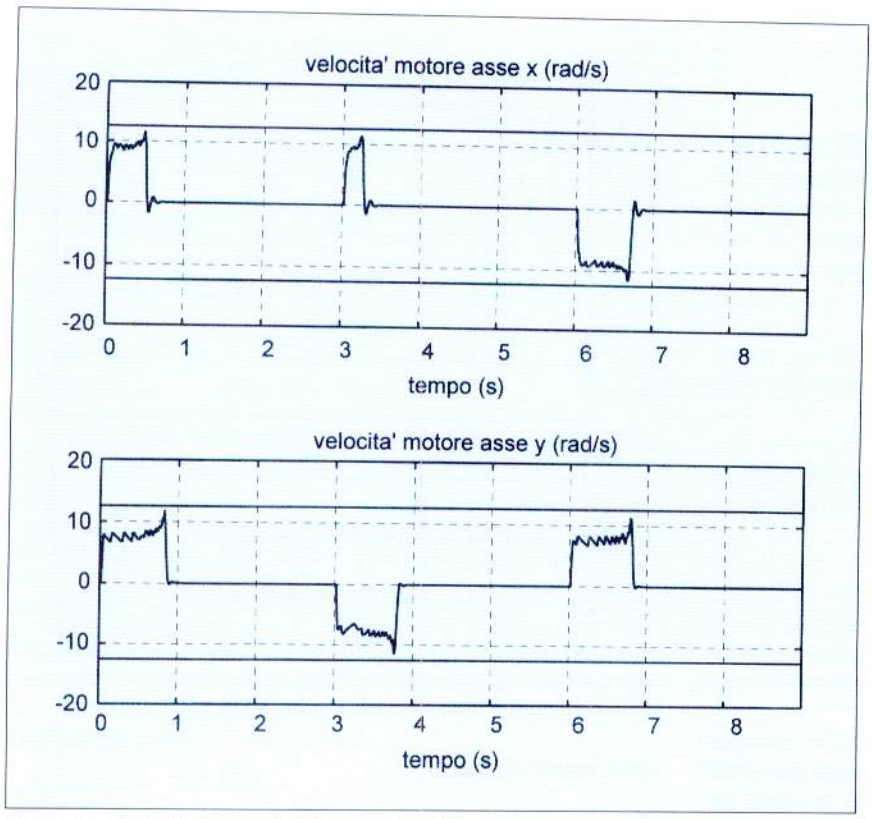


Figura 6 - Velocità angolari dei motori (rad/s)

niera tale che il corrispondente valore di regime stazionario H_{cw} (1)w(t) sia ammissibile, essendo H_{cw} (z) la funzione di trasferimento da w a c. In seguito si userà il simbolo "|t" per rappresentare sinteticamente che vi è una dipendenza dallo stato x(t) e dal valore desiderato w(t). La struttura che viene scelta per il riferimento virtuale è la seguente:

$$r(t+k|t)=\gamma^k\mu+w(t) \qquad (1)$$

dove μ è un parametro che deve essere determinato ad ogni passo t. Qui di seguito, per semplicità, si supporrà che il riferimento sia scalare. Di questa successione di infiniti valori, secondo la già descritta logica ad orizzonte recessivo, soltanto il primo viene poi realmente immesso nella catena di controllo in retroazione:

$$r(t) = r(t\backslash t) \qquad (2)$$

Chiamiamo c(t+k|t) l'evoluzione della grandezza vincolata che si avrebbe applicando il riferimento (1) partendo dallo stato x(t). Con questo tipo di scelta di r, la dinamica di c(t+k|t) può essere sagomata a seconda di come viene scelto il parametro μ.
Nelle Figure (2) e (3) viene riportato un esempio per un sistema LTI (lineare tempo invariante), scegliendo γ=0,9, w(0)=1, x(0) nullo e $H_{cw}(z)$ con poli complessi coniugati. L'idea consiste nello scegliere ad ogni istante t il parametro $\mu(t)$ che dà il minor tempo di assestamento di y(t+k|t) sul valore w mantenendo c(t+k|t) ammissibile. A tale scopo si definisce un indice di prestazione

$$J(\mu)=\rho\left[r(t|t)-w(t)\right]^2+\sum_{k=0}^{\infty}\left[y(t+k|t,\mu)-w(t)\right]^2 \quad \rho>0 \qquad (3)$$

il quale risulta tanto minore quanto più velocemente y si porta sul valore w. Il valore $\mu(t)$ verrà allora scelto come il minimo del funzionale J (μ) soggetto ai vincoli

$$c\,(t+k\backslash t,\mu)\in C,\ \forall k\geq 0 \qquad (4)$$

dove C è l'insieme dei valori ammissibili per c. Se ad esempio c(t) rappresentasse l'ingresso u(t) dell'impianto soggetto a vincoli di saturazione dovuti ai limiti fisici di un attuatore, risulterebbe

$$C=[C^-,C^+] \qquad (5)$$

essendo C^- e C^+ rispettivamente i livelli minimo e massimo che l'attuatore è in grado di produrre; in questo caso il FPR avrebbe la funzione di evitare fenomeni di windup. Nel caso in cui nessun valore del parametro μ risulti ammissibile ad un certo passo t, i vincoli possono essere ancora soddisfatti ponendo

$$r(t) = r(t\backslash t-1) \qquad (6)$$

Con questo tipo di scelta del riferimento r(t) si può dimostrare il seguente risultato [4]:

Risultato 1

per ρ>0 e w(t)≡w:

- Il sistema complessivo è asintoticamente stabile;
- $\lim_{t\to\infty} y(t)=w$
- $c(t)\in C\ \forall t\geq 0$.

Si veda adesso come calcolare il parametro $\mu(t)$ in termini delle relazioni che intercorrono fra le variabili di sistema. Si supponga che l'impianto ad anello chiuso sia LTI esprimibile nella forma

$$\begin{cases} x(t+1) = \Phi x(t)+Gr(t) \\ y(t) = Hx(t) \\ c(t) = H_c x(t)+D_c r(t) \end{cases}$$

In tal caso la funzione J(μ) risulta quadratica:
$J(\mu)=a\mu^2+2b\mu+c$, dove a, b e c possono essere calcolate risolvendo fuori linea [4] l'equazione di Lyapunov

$$L=\begin{bmatrix}\gamma & 0\\ G & \Phi\end{bmatrix}^T L\begin{bmatrix}\gamma & 0\\ G & \Phi\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & H^TH\end{bmatrix} \qquad (8)$$

Per quanto riguarda i valori ammissibili per il parametro μ si consideri il caso in cui il vincolo (4) sia del tipo

$$C^-\leq c(t+k\backslash t,\mu)\leq C^+ \qquad (9)$$

come in (5). Per semplicità si supponga che c sia una grandezza scalare. Il vincolo (9) può essere trasformato [4] con

facili operazioni in un vincolo sul parametro μ del tipo $\mu^- \le \mu \le \mu^+$. La minimizzazione di $J(\mu)$ si ha quindi per

$$\mu(t)=\begin{cases} \mu^- & \text{se} \quad \frac{b}{a} \le \mu^- \\ -\frac{b}{a} & \text{se} \quad \mu^- \le \frac{b}{a} \le \mu^+ \\ \mu^+ & \text{se} \quad \frac{b}{a} \ge \mu^+ \end{cases} \qquad (10)$$

Nel caso in cui non sia possibile calcolare esplicitamente $J(\mu)$ e l'insieme dei μ ammissibili, ad esempio perché il sistema presenta delle non linearità, può essere adottato un approccio per tentativi [2], [3].
Questo consiste nello scegliere il parametro $\mu(t)$ al generico passo t eseguendo il seguente algoritmo:

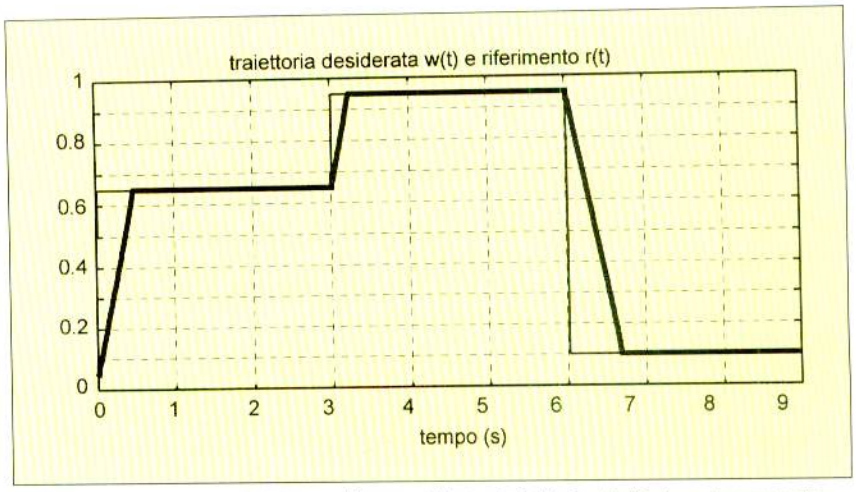


Figura 7 - Traiettoria desiderata (linea sottile) e traiettoria di riferimento generata dal filtro predittivo (linea spessa)

Algoritmo 1

1. Costruisci il riferimento virtuale $r(t+k \setminus t, \mu) \equiv w(t)$, $\forall t \ge 0$ (cioè poni $\mu=0$);
2. Calcola l'evoluzione $c(t+k\setminus t, \mu)$ su un orizzonte di predizione di M passi dovuta a $r(t+k\setminus t, \mu)$ iterando il modello dell'impianto e della legge di controllo primaria;
3. $c(t+k \setminus t, \mu)$ soddisfa i vincoli per ogni valore di $k \le M$?:
3a. (SI): Poni $r(t) = r(t \setminus t, \mu)$ calcola l'ingresso u(t) che deve essere dato all'attuatore e vai a 5;
3b. (NO): Vai a 4;
4. Puoi provare altri riferimenti virtuali (cioè altri valori di μ)?:
4a. (SI): Assegna a μ un nuovo valore e vai a 2;
4b. (NO): Poni $r(t) = r(t \setminus t-1)$. Vai a 5;
5. Stop.

Il carico computazionale dell'*Algoritmo 1* dipende evidentemente dalla lunghezza dell'orizzonte di predizione M e dal numero massimo di tentativi che il Fpr può effettuare prima di rinunciare ed eseguire il passo (4b).
Una possibile soluzione consiste nel restringere la scelta di μ ad un insieme discreto di valori. A tale scopo si definisca una griglia di K valori $G = \{g_0, g_1, \ldots, g_{k-1}\}$ e si decida di scegliere il parametro μ nella forma

$$\mu = g_i\,[y(t) - w(t)] \qquad (11)$$

Come scegliere la griglia G? Un'idea di massima si può ricavare analizzando le Figure 2 e 3. Ad esempio si può porre $g_0 = 0$, $g_i = 1-1/i$, $i = 1, 2, \ldots, K-1$. Evidentemente maggiore è K migliori saranno le prestazioni, ma maggiore sarà il numero di operazioni da effettuare in linea nel caso computazionalmente più sfavorevole, corrispondente alla situazione in cui il passo (4b) viene eseguito. In tal caso, l'algoritmo effettua, infatti, complessivamente K predizioni. Il parametro K deve essere scelto in modo direttamente proporzionale al prodotto tempo di campionamento*efficienza computazionale della unità di elaborazione. Come risulterà chiaro dai risultati simulativi, i vincoli imposti in genere rallentano la risposta del sistema. Questo suggerisce che la legge di controllo primaria debba essere progettata in maniera tale che in assenza di vincoli, ad anello chiuso il sistema sia abbastanza pronto.

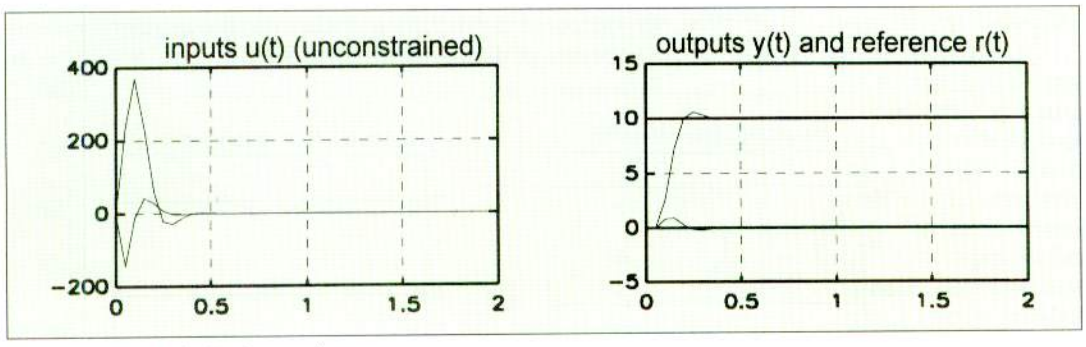


Figura 8 - Esempio 3: sistema lineare

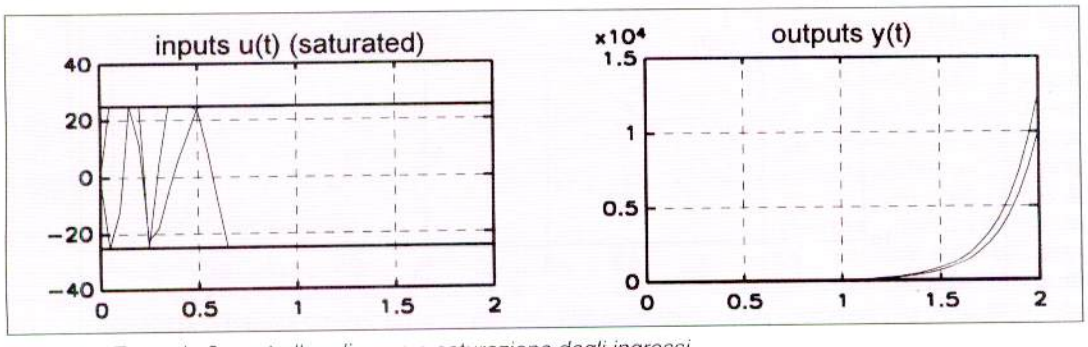


Figura 9 - Esempio 3: controllore lineare e saturazione degli ingressi

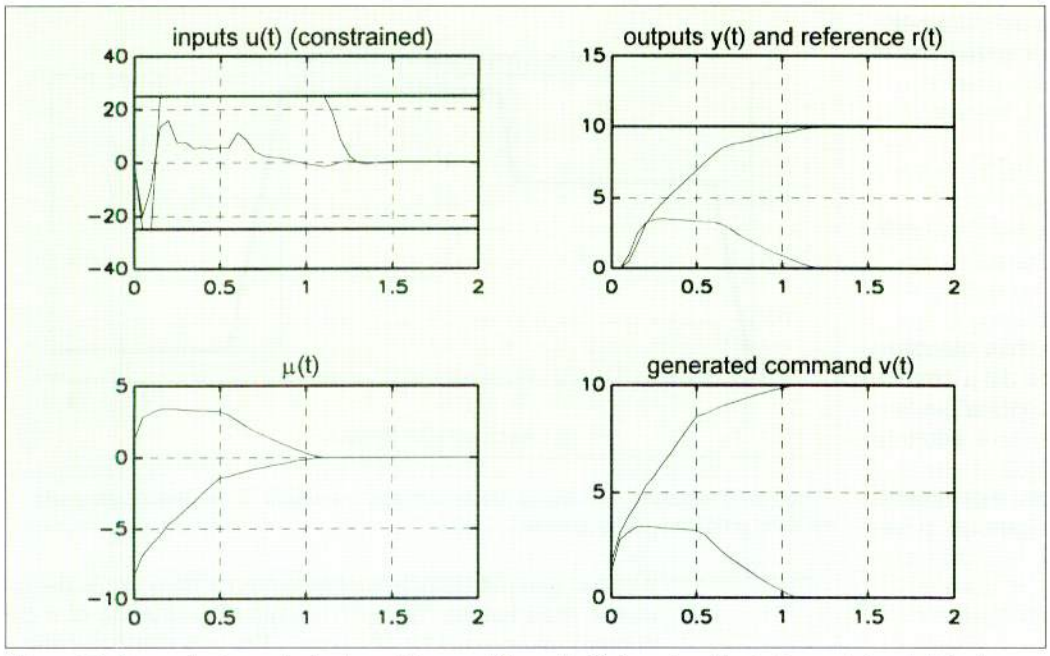


Figura 10 - Esempio 3: prestazioni con filtro predittivo del riferimento attivato (caso deterministico)

Risultati simulativi

Esempio 1

Si consideri il modello lineare a tempo discreto

$$y(t)=\frac{-0{,}0488z^{-1}+0{,}0488z^{-2}}{1-1.9517z^{-1}+0{,}9517z^{-2}}u(t) \qquad (12)$$

ottenuto campionando con un passo T_s = 0,005 s e introducendo uno *zero-order holder* l'impianto (instabile)

$$y(\tau)=\frac{1+10s}{(1+0{,}1s)(1-10s)}u(\tau) \qquad (13)$$

per il quale si desidera sia inseguita un'onda quadra. In Figura 4 viene mostrato il comportamento del sistema regolato con un controllore LQ (lineare quadratico) in assenza di vincoli (linea tratteggiata) e in presenza del vincolo $|u(t)| \leq 3$ (linea continua) nel qual caso viene azionato il Fpr. Poiché il sistema ad anello aperto è instabile, la funzione di trasferimento da w(t) a u(t) è a fase non minima, il che spiega la presenza di forti sovraelongazioni dell'ingresso. Come si può notare, grazie al Fpr i vincoli sono rispettati e pertanto viene evitato ogni eventuale fenomeno di *windup* o addirittura instabilità dovuto alla saturazione degli ingressi.

Esempio 2

Si desidera applicare la tecnica di filtraggio predittivo del riferimento per il controllo numerico di una macchina utensile a due assi in cui sono presenti dei vincoli sulle velocità angolari di entrambe i motori elettrici in corrente continua che muovono l'utensile.
Il modello considerato è quello descritto in [8], in cui ciascun motore viene controllato con una rete anticipatrice/derivatrice.
Il riferimento viene discretizzato con un passo T_s = 0,01 s e fornito al controllore analogico tramite uno *zero-order holder*. L'obiettivo consiste nel posizionare l'utensile in punti del piano x-y.
Tali posizioni non sono necessariamente preassegnate da programma, ma possono essere comandate in tempo reale. Il Fpr provvede a generare una traiettoria di riferimento tale che ognuno dei due motori rispetti il vincolo sulla velocità angolare

$$|\omega_m(t)| \leq 12.57\,\text{rad/s} \qquad (14)$$

In Figura 5 viene riportato il percorso descritto dall'utensile sul piano x-y, in Figura 6 le velocità angolari dei motori e infine in Figura 7 le traiettorie di riferimento che vengono generate dal Fpr. In questo esempio è stato sufficiente usare un orizzonte di predizione di M=2 passi e quindi un numero di operazioni decisamente contenuto.

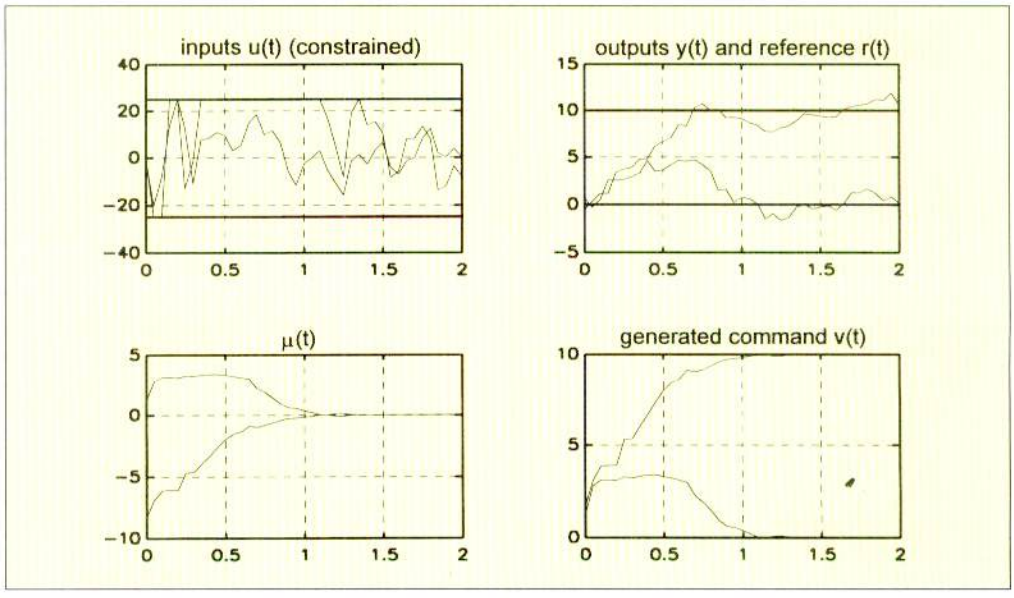


Figura 11 - Esempio 3: prestazioni con il filtro predittivo del riferimento attivato in presenza di rumore sulle uscite

Esempio 3

Si utilizzi la tecnica descritta nella parte precedente per controllare la dinamica di un aereo AFTI-16 il cui modello viene descritto in [12].
L'ingresso u(t) in questo caso è costituito dall'inclinazione del timone e del flap-alettone, soggetti entrambi ai vincoli fisici

$$|u_i(t)| \leq 25°, \quad i = 1,2$$

L'uscita y(t) è costituita dagli angoli di incidenza e di beccheggio. L'obbiettivo è quello di avere un errore di inseguimento nullo in condizione di regime stazionario costante e di evitare possibili instabilità ad anello chiuso dovute alla saturazione degli ingressi.
Il modello a tempo continuo viene campionato ogni T_s= 0,05 s con introduzione di zero-order holder. L'impianto viene inizialmente stabilizzato da un controllore primario di tipo LQG (vedi [4]), il quale stima lo stato dalle misurazioni della uscita attraverso un filtro di Kalman.
La simulazione viene effettuata supponendo che inizialmente le uscite siano entrambe nulle e che si desideri portare l'angolo di beccheggio a 10°. La traiettoria di riferimento viene quindi ad essere $w(t) \equiv [0, 10]^T$. In Figura 8 viene riportata la risposta che il sistema darebbe in assenza di saturazione degli ingressi.
Si può notare come i limiti ±25° siano violati. In Figura 9 si vede come il sistema diventi instabile se regolato con la legge di controllo LQG ignorando i vincoli di saturazione. Nelle Figure 10 e 11 vengono raffigurate le traiettorie che si hanno attivando il Fpr rispettivamente nel caso deterministico e nel caso più realistico in cui le misure delle uscite siano affette da rumore gaussiano a varianza unitaria.

Conclusioni

La manipolazione della variabile di riferimento consente di risolvere problemi di controllo in cui sono presenti dei vincoli sulle variabili di stato o dovuti a fenomeni di saturazione degli attuatori.
La metodologia qui presentata presuppone che sia disponibile un modello del sistema controllato mediante il quale sia possibile predirne in linea l'evoluzione; quindi può essere considerata a tutti gli effetti una tecnica di tipo predittivo. I successi ottenuti nella applicazioni e parallelamente i risultati teorici sviluppati nel corso degli ultimi anni fanno prevedere una prossima diffusione del controllo predittivo in vari settori dell'industria. ▲

Bibliografia

[1] A. Bemporad, *Controllo predittivo in presenza di vincoli e gestione in linea del riferimento*, Tesi di laurea, Dipartimento Sistemi e Informatica, Università di Firenze, Firenze, Italia, dic. 1993.
[2] A. Bemporad, E. Mosca, *Constraint fulfilment in feedback control via predictive reference management*, 3rd Ieee Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK, 1994.
[3] A. Bemporad, E. Mosca, *Constraint fulfilment in control systems via predictive reference management*, 33rd Ieee Control and Decision Conference, Lake Buena Vista, Florida, Usa, 1994.
[4] A. Bemporad, E. Mosca, *Nonlinear control of constrained systems via predictive reference management*, RT 32/94 Dipartimento Sistemi e Informatica. Articolo inviato alle Ieee Trans. Automat. Control, 1994
[5] C.R. Cutler, B. L. Ramaker, *Dynamic matrix control - A computer control algorithm*, Proceedings Jacc, San Francisco, Usa, 1980.
[6] E.G. Gilbert, K. Tin Tan, *Linear systems with state and control constraints: the theory and applications of maximal output admissible sets*, Ieee Trans. Automat. Control, AC-36, 1.008-1.020, 1991.
[7] E.G. Gilbert, I. Kolmanovsky, K. Tin Tan, *Discrete-time reference governors and the nonlinear control of systems with state and control constraints*, Proc Ieee Control and Decision Conf., dic. 1994.
[8] T. J. Graettinger, B. H. Krogh, *On the computation of reference signal constraints for guaranteed tracking performance*, Automatica, vol. 28, pag.1.125-1.141, 1982.
[9] P. O. Gutman, P. Hagander, A new design of constrained controllers for linear systems, Ieee Trans. Automat. Control, AC-30, pag. 22-33, 1985.
[10] S. S. Keerthi, E. G. Gilbert, *Optimal infinite-horizon feedback control laws for a general class of constrained discrete-time systems: stability and moving-horizon approximations, J. Optimization Theory and Applications*, vol. 57, pag. 265-293, 1988.
[11] P. Kapasouris, M. Athans, G. Stein, *Design of feedback control systems for stable plants with saturating actuators*, Proc. 27th Ieee Conference on Decision and Control, 469-479, Austin,Texas, Usa, 1988.
[12] P. Kapasouris, M. Athans, G. Stein, *Design of feedback control systems for unstable plants with saturating actuators*, Proc. Ifac Symposium on Nonlinear Control System Design, Pergamon Press, 1990.
[13] W. H. Kwon, A. E. Pearson, *On feedback stabilization of time-varying discrete linear systems*, Ieee Trans. Automat. Control, AC-23, pag. 479-481, 1988.
[14] D. Q. Mayne, H. Michalska, *Receding horizon control of nonlinear systems*, Ieee Trans. Automat. Control, AC-35, pag. 814-824, 1990.
[15] D. Q. Mayne, E. Polak, *Optimization based design and control, Preprints* Ifac 12th World Congress, vol. 3, pag. 129-138, Sydney, Australia, 1990.
[16] E. Mosca, *Optimal, Predictive, and Adaptive Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. Y., 1995.
[17] E. Mosca, J. Zhang, *Stable redesign of predictive control*, Automatica, vol. 28, pag. 1.229-1.233, 1992.
[18] B. Rawlings, K. R. Muske, *The stability of constrained receding-horizon control*, Ieee Trans. Automat. Control, vol. 38, pag. 1.512-1.516, 1993.
[19] J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon, *Model predictive heuristic control: applications to industrial processes*, Automatica, vol. 14, n. 5, pag. 413-428, 1978.
[20] J. Richalet, *Industrial applications of model based predictive control*, Automatica, vol. 29, pag. 1.251-1.274, 1993.
[21] T. T. C. Tsang, D. W. Clarke, *Generalized predictive control with input constraints* Ieee Proc. Pt. D, vol. 135, pag. 451-460, 1988.