

# OTTIMIZZAZIONE IN LINEA DEL SET-POINT PER PROCESSI INDUSTRIALI SOGGETTI A SATURAZIONI O VINCOLI SULLO STATO

Alberto Bemporad, Alessandro Casavola, Edoardo Mosca  
Dipartimento di Sistemi e Informatica, Università di Firenze, Via S. Marta, 3, 50139 Firenze  
tel.: 055 4796258 - fax: 055 4796363. E-mail: mosca@dsi.ing.unifi.it

## **Riassunto**

*In questa memoria si affronta il problema del controllo di processi industriali soggetti a vincoli sulle variabili di stato e/o di ingresso. La soluzione che si propone consiste nel modificare in linea, quando necessario, il set-point di riferimento in modo da garantire evoluzioni del processo che soddisfino i vincoli imposti. L'idea di modificare soltanto il set-point di riferimento ha il vantaggio di potere essere implementata senza modificare la struttura dei loop interni di controllo già esistenti. La soluzione proposta consente di ottenere il rispetto dei vincoli e buone prestazioni in termini di inseguimento del set-point, richiedendo potenze di calcolo contenute, ampiamente disponibili su hardware commerciale a basso costo.*

## **Parole chiave**

*Controllo con vincoli, ottimizzazione del set-point, programmazione quadratica*

## **1. Introduzione**

I processi industriali sono diventati sempre più complessi mano a mano che la competizione globale sul mercato ha richiesto standard di flessibilità e di produttività sempre più difficili da soddisfare. Per far fronte a questa complessità, si utilizzano oggi architetture gerarchiche di controllo e supervisione. Tipiche funzioni, ai diversi livelli di gerarchia, sono le procedure di avviamento e arresto del processo, il cambio dei set-point, l'individuazione dei guasti, e il rispetto di condizioni operative a norma di sicurezza. Queste funzioni devono inevitabilmente tener conto di vincoli fisici, di funzionamento e operativi, in particolare durante i transitori. Ad esempio, i motori elettrici sono soggetti a limiti sulle tensioni e correnti di alimentazione; nei reattori chimici le emissioni di inquinanti devono rispettare le norme ambientali; valvole, compressori e pompe hanno di fatto limiti operativi. Normalmente, si ricorre a soluzioni che sottoutilizzano i componenti del processo, ad esempio sovradimensionando i componenti stessi.

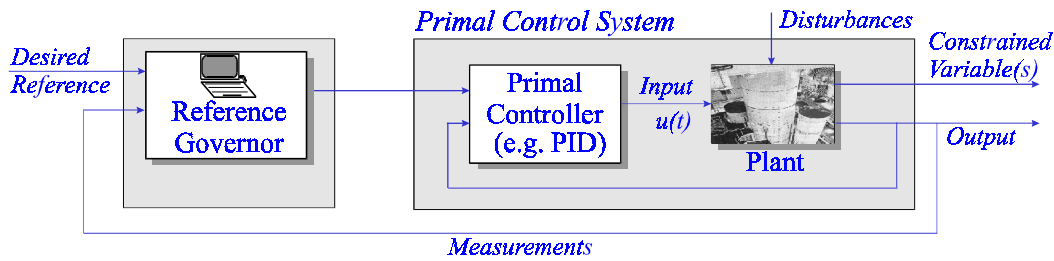
In ogni caso, l'importanza di assicurarsi la garanzia del rispetto dei vincoli in tutte le condizioni di esercizio dell'impianto è un requisito fondamentale. Recenti studi sul disastro nucleare di Chernobyl del 1986 hanno dimostrato per esempio che una delle cause principali dell'incidente è dovuta alla limitata velocità di estrazione delle barre radioattive dal reattore [17]. È ben noto inoltre che nei sistemi avionici avanzati la stabilità ad anello chiuso può essere compromessa dalla saturazione degli attuatori (angoli di timone e di alettone) a causa della non minimalità di fase e instabilità ad anello aperto del veicolo, come mostreremo nel paragrafo 3.

Le tecniche di controllo attualmente più diffuse (PID, reti anticipatrici/ritardatrici, LQG,  $H_\infty$ ) risolvono in maniera soddisfacente problemi di stabilizzazione, robustezza e reiezione dei disturbi, ma non sono in grado di tenere esplicitamente in conto della presenza di vincoli.

A differenza di queste tecniche di controllo, il *controllo predittivo* (CP) permette di gestire in maniera sistematica e in linea 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 CP fu introdotto alla fine degli anni settanta [18]. 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 [15,16]. Il CP comporta di risolvere numericamente ad ogni istante di campionamento un problema di programmazione quadratica la cui soluzione fornisce la successione degli ingressi di controllo relativi all'orizzonte di predizione considerato. Di tali ingressi viene applicato solo quello corrispondente al primo istante di tempo e tutta l'operazione è ripetuta all'istante di campionamento successivo, e così via. Tale modalità di funzionamento è chiamata ad *orizzonte recessivo* e rende il controllo predittivo un vero e proprio controllo in retroazione, giacché la variabile di controllo ad ogni istante dipende dallo stato corrente del sistema, oltreché dalla predizione della sua evoluzione "virtuale" futura. L'idea alla base del CP è di fatto quella propria di molti comportamenti umani. Tipico in tal senso il caso del conducente di un'autovettura che, per prevenire azioni sul volante o sui freni troppo violente, "guarda la strada sufficientemente lontano": in termini più tecnici, applica comandi istantanei sulla base dell'evoluzione predetta su un intervallo di tempo limitato, decidendo, più o meno consapevolmente, quale comando applicare facendo "recedere" l'orizzonte di predizione [10-14].



**Figura 1. Soddisfacimento di vincoli mediante Reference Governor.**

Al fine di ridurre drasticamente i costi computazionali insiti nel CP, in questa memoria presentiamo una tecnica denominata *Reference Governor* (RG) che usa il paradigma del controllo a orizzonte recessivo per manipolare il set-point anziché la variabile di comando. Il RG è un dispositivo che agisce su un sistema già compensato. Il compensatore interno si assume progettato per assicurare stabilità, prestazioni e reiezioni dei disturbi quando i vincoli non sono attivi, tipicamente nel caso di funzionamento ai piccoli segnali nell'intorno di un punto di lavoro. Nei transitori dovuti a variazioni del set-point, i vincoli possono diventare attivi. Il compito del RG è allora quello di modificare (quando necessario) il riferimento desiderato al fine di assicurare la transizione il più veloce possibile compatibilmente con i vincoli. A differenza del CP, in cui i problemi di stabilizzazione/inseguimento e soddisfacimento dei vincoli sono risolti contemporaneamente, qui i due problemi vengono separati: prima si stabilizza il sistema con un compensatore lineare tradizionale, poi si applica il RG per il soddisfacimento dei vincoli.

## 2. Reference Governor (RG)

Consideriamo per semplicità un sistema lineare descritto dalle equazioni

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

dove  $x(t)$  è lo stato del sistema,  $y(t)$  l'uscita di interesse che vorremmo inseguisse il riferimento desiderato  $w(t)$ ,  $r(t)$  l'ingresso di riferimento effettivamente fornito al sistema dal RG, e  $c(t)$  il vettore su cui vogliamo imporre dei vincoli.

Supponiamo che ad ogni istante di campionamento  $t$  il RG generi un *riferimento virtuale*  $r(t+i/t)$ ,  $i=0, 1, \dots, \infty$ , 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  $i \rightarrow \infty$  tenda al

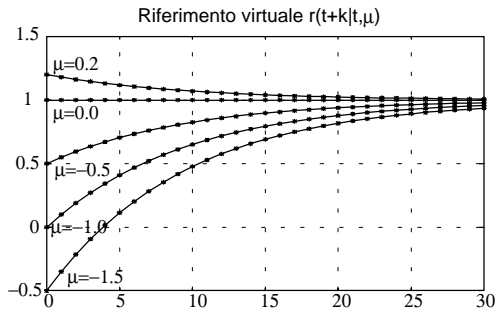


Figura 2 -  $r(t+k|t, \mu)$  per diversi valori di  $\mu$

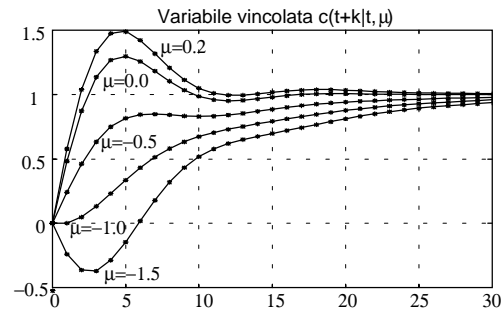


Figura 3 -  $c(t+k|t, \mu)$  relativa alla Fig. 2

valore desiderato  $w(t)$ . In seguito useremo 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:

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

dove  $\mu$  è un parametro che deve essere determinato ad ogni passo  $t$ . Qui di seguito, per semplicità, supporremo 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:

$$r(t) = r(t|t) \quad (2)$$

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  $\mu$ . Nelle Figure (2) e (3) viene riportato un esempio per un sistema LTI (lineare tempo invariante), scegliendo  $\gamma=0.9$ ,  $w(0)=1$ ,  $x(0)$  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 definiamo un *indice di prestazione*

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

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  $J(\mu)$  soggetto ai vincoli

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

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

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

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

$$r(t) = r(t|t-1) \quad (6)$$

Si noti che la desiderata riduzione della complessità computazionale è ottenuta parametrizzando la traiettoria di riferimento mediante un numero molto limitato di parametri, ad esempio un solo parametro scalare, e ottimizzando rispetto ai parametri stessi. Questo consente di implementare il RG su schede a microcontrollore programmabile e reti di comunicazione a basso costo.

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

*Risultato 1.* Per  $\rho > 0$  e  $w(t) \equiv w$ :

1. Il sistema complessivo è asintoticamente stabile ;
2.  $y(t) \rightarrow w$  per  $t \rightarrow \infty$
3.  $c(t) \in C \forall t \geq 0$

Vediamo adesso come calcolare il parametro  $\mu(t)$  in termini delle relazioni che intercorrono fra le variabili di sistema.

La funzione  $J(\mu)$  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

$$L = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ G & \Phi \end{bmatrix}^T L \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ G & \Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H^T H \end{bmatrix}$$

Per quanto riguarda i valori ammissibili per il parametro  $\mu$  consideriamo il caso in cui il vincolo (4) sia del tipo

$$C^- \leq c(t+k|t, \mu) \leq C^+ \quad (9)$$

come in (5). Per semplicità supponiamo che  $c$  sia una grandezza scalare. Il vincolo (9) può essere trasformato [4] con facili operazioni in un vincolo sul parametro  $\mu$  del tipo  $\mu^- \leq \mu \leq \mu^+$ . La minimizzazione di  $J(\mu)$  si ha quindi per

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

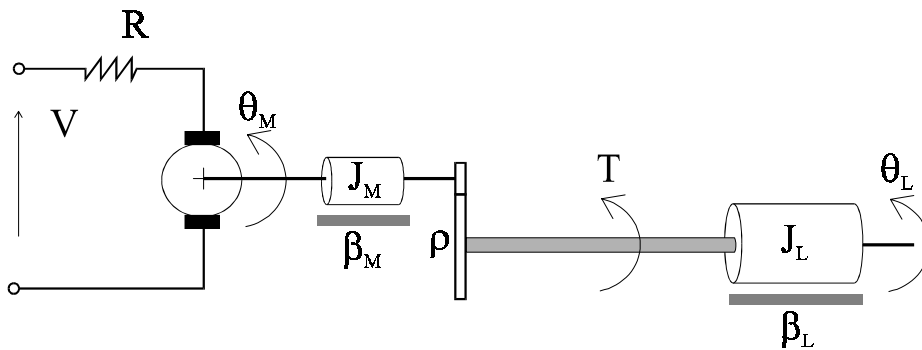


Figura 4 - Modello del servomeccanismo di posizione.

Nel caso in cui non sia possibile calcolare esplicitamente  $J(\mu)$  e l'insieme dei  $\mu$  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:

*Algoritmo 1:*

1. Costruisci il riferimento virtuale  $r(t+k|t, \mu) \equiv w(t)$ ,  $\forall t \geq 0$  (cioè poni  $\mu = 0$ );
2. Calcola l'evoluzione  $c(t+k|t, \mu)$  su un orizzonte di predizione di  $M$  passi dovuta a  $r(t+k|t, \mu)$ , iterando il modello dell'impianto e della legge di controllo primaria;
3.  $c(t+k|t, \mu)$  soddisfa i vincoli per ogni valore di  $k \leq M$ ?
  - 3a. (SI): Poni  $r(t) = r(t|t, \mu)$ , 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  $\mu$ )?
  - 4a. (SI): Assegna a  $\mu$  un nuovo valore e vai a 2;
  - 4b. (NO): Poni  $r(t) = r(t|t-1)$ . 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  $\mu$  ad un insieme discreto di valori. A tale scopo definiamo una *griglia* di  $K$  valori  $G = \{g_0, g_1, \dots, g_{K-1}\}$  e decidiamo di scegliere il parametro  $\mu$  nella forma

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

Come scegliere la griglia  $G$ ? Una idea di massima si può ricavare analizzando le Figure 2 e 3. Ad esempio si può porre  $g_0 = 0$ ,  $g_i = 1 - 1/i$ ,  $i = 1, 2, \dots, K-1$ . 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.

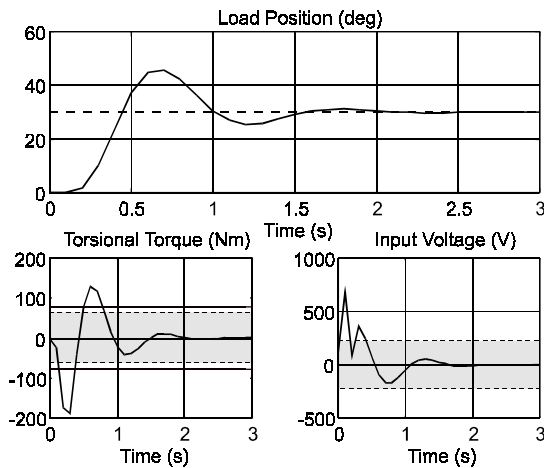


Figura 5 - Risposta senza RG. Vincoli violati

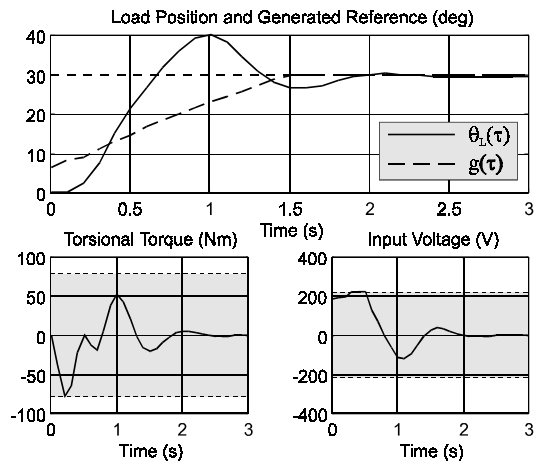


Figura 6 - Risposta con RG.

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.

### 3. Risultati simulativi

*Esempio 1.* Consideriamo il servomeccanismo di posizione descritto in Fig. 4, costituito da un motore in c.c., una scatola di riduzione, un albero di elasticità non trascurabile, e un carico. Le specifiche tecniche impongono dei limiti sulla coppia torcente  $T$  e sulla tensione di alimentazione del motore  $V$ . I parametri del sistema sono riportati in [3]. Indicando con  $\theta_M$  e  $\theta_L$  rispettivamente la posizione angolare del motore e del carico, e definendo il vettore di stato

$$x_p = [\theta_L \ \dot{\theta}_L \ \theta_M \ \dot{\theta}_M]^T$$

il modello può essere descritto nella seguente forma di stato

$$\dot{x}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_\theta}{J_L} & -\frac{\beta_\theta}{J_L} & \frac{k_\theta}{\rho J_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_\theta}{\rho^2 J_M} & 0 & -\frac{k_\theta}{\rho^2 J_M} & -\frac{\beta_M + k_T^2 / R}{J_M} \end{bmatrix} x_p + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_T}{J_M} \end{bmatrix} V$$

$$\theta_L = [1 \ 0 \ 0 \ 0] x_p, \quad T = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_\theta}{\rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} x_p$$

L'albero è costituito d'acciaio e presenta quindi una resistenza al taglio finita  $\tau_{adm} = 50 \text{ N/mm}^2$ , imponendo quindi il vincolo sulla coppia torcente  $|T| \leq 78.5 \text{ Nm}$ . Inoltre la tensione di ingresso deve rispettare i limiti  $|V| \leq 220 \text{ V}$ . Il modello è stato trasformato a tempo discreto campionando con un passo  $T_s = 0.1 \text{ s}$  e utilizzando uno *zero-order holder*

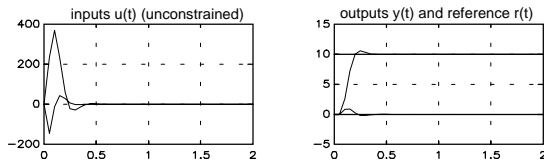


Figura 7 - Risposta lineare (vincoli violati)

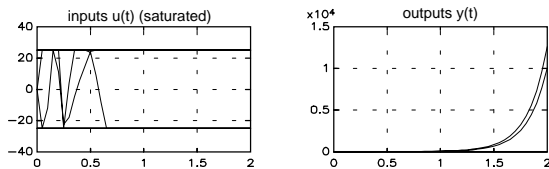


Figura 8 - Esempio 2: controllore lineare e saturazioni degli ingressi.

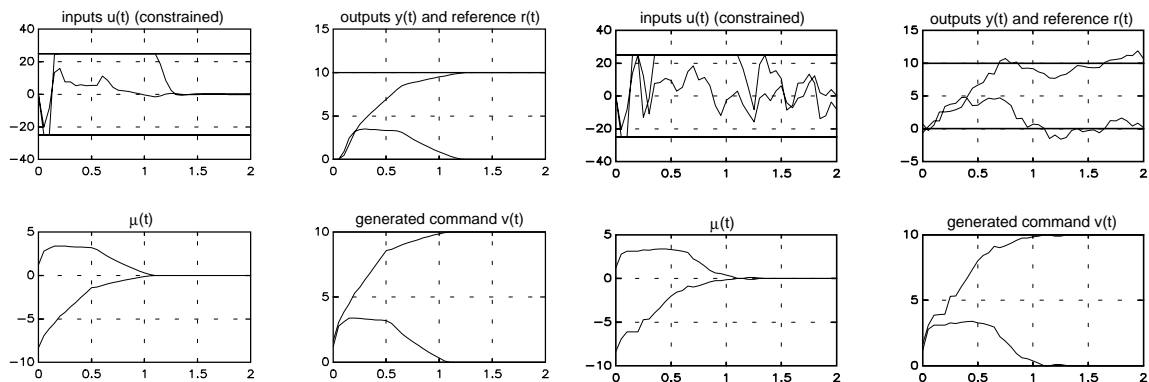
sulla tensione di ingresso. Mediante posizionamento dei poli, è stato progettato un controllore la cui funzione di trasferimento dall'errore  $e=(r-\theta_L)$  all'ingresso  $V$  è la seguente

$$G_c(z) = 1000 \frac{9.7929z^3 - 2.1860z^2 - 7.2663z + 2.5556}{10z^4 - 2.7282z^3 - 3.5585z^2 - 1.3029z - 0.0853}$$

Il sistema ad anello chiuso risulta essere molto pronto, ma i vincoli di tensione e coppia torcente sono violati, come raffigurato in Fig. 5 per un set-point di riferimento  $r=30$  deg. In Fig. 6 vengono riportate le traiettorie ottenute applicando il RG. Come si nota, i vincoli vengono soddisfatti. Computazionalmente, il RG ha richiesto una media di 720 flops per passo di campionamento.

*Esempio 2.* Utilizziamo la tecnica descritta nel paragrafo precedente per controllare la dinamica di un aereo AFTI-16 il cui modello viene descritto in [4]. L'ingresso  $u(t)$  in questo caso è costituito dall' inclinazione del timone e del flap-alettone, soggetti entrambe ai vincoli fisici  $|u_i(t)| \leq 25^\circ$ ,  $i = 1,2$ . L'uscita  $y(t)$  è costituita dagli angoli di incidenza e di beccheggio. L'obiettivo 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 [2]), 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  $10^\circ$ . La traiettoria di riferimento viene quindi ad essere  $w(t) \equiv [0, 10]^T$ . In Figura 7 viene riportata la risposta che il sistema darebbe in assenza di saturazione degli ingressi. Si può notare come i limiti  $\pm 25^\circ$  siano violati. In Figura 8 si vede come il sistema diventi instabile se regolato con la legge di controllo LQG ignorando i vincoli di saturazione. Nelle Figure 9 e 10 vengono raffigurate le traiettorie che si hanno attivando il RG rispettivamente nel caso deterministico e nel caso più realistico in cui le misure delle uscite siano affette da rumore gaussiano a varianza unitaria.





**Figura 9 - Risposta con RG (deterministico).**

**Figura 10 - Esempio 2: Risposta con RG (in presenza di rumore sulle uscite).**

#### 4. 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. L'idea di modificare soltanto il set-point di riferimento ha il vantaggio di potere essere implementata senza modificare la struttura dei loop interni di controllo già esistenti. Sebbene in questa memoria si sia considerato il caso lineare deterministico, estensioni sono state considerate in [3,20] nel caso di incertezze, in [4,19] nel caso non lineare, mentre in [5] si è considerato il caso specifico di tracking di traiettoria preassegnata per robot vincolati. In ognuno dei precedenti lavori si è visto come le soluzioni proposte richiedano potenze di calcolo relativamente modeste. Futuri sviluppi riguarderanno quindi applicazioni in casi di interesse reale.

#### Bibliografia

- [1] Bemporad, A. ed E. Mosca, *Constraint fulfilment in feedback control via predictive reference management*, 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK, 1994.
- [2] Bemporad, A., Casavola, A. ed E. Mosca, *Nonlinear control of constrained systems via predictive reference management*, IEEE Trans. Automat. Control, vol. AC-42, n. 3, pagg. 340-349, Marzo 1997
- [3] Bemporad, A. ed E. Mosca, *Fulfilment hard constraints in uncertain linear systems via reference management*, Automatica, in corso di stampa.
- [4] A. Bemporad, *Reference governor for constrained nonlinear systems*, IEEE Trans. Automat. Control, in corso di stampa.
- [5] Bemporad, A. and T.J. Tarn, *On-line path parameterization for manipulators with input/state constraints*, Proc. IEEE/ASME Intern. Conf. on Adv. Intell. Mechatr. (AIM97), Tokio, Japan, Giugno 1997.
- [6] Kamasouris, P., Athans, M. e 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, U.S.A., 1988.
- [7] Kamasouris, P., Athans, M. e G. Stein, *Design of feedback control systems for unstable plants with saturating actuators*, Proc. IFAC Symposium on Nonlinear Control System Design, Pergamon Press, 1990.

- [8] Gilbert, E.G. e 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, 1008-1020, 1991.
- [9] Gilbert, E.G., Kolmanovsky, I., e K. Tin Tan, *Discrete-time reference governors and the nonlinear control of systems with state and control constraints*, Int. Journal of Robust and Nonlinear Control, 1995, pagg. 487—504.
- [10] Keerthi, S. S. ed 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, pp. 265-293, 1988.
- [11] Mayne, D. Q. e H. Michalska, *Receding horizon control of nonlinear systems*, IEEE Trans. Automat. Control, AC-35, pp. 814-824, 1990.
- [12] Mosca, E., *Optimal, Predictive, and Adaptive Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. Y., 1995.
- [13] Mosca, E. e J. Zhang, *Stable redesign of predictive control*, Automatica, Vol. 28, pp. 1229-1233, 1992.
- [14] Rawlings, J. B. e K. R. Muske, *The stability of constrained receding-horizon control*, IEEE Trans. Automat. Control, Vol. 38, pp. 1512-1516, 1993.
- [15] Richalet, J., Rault., A., Testud, J.L. e J. Papon, *Model predictive heuristic control: applications to industrial processes*, Automatica, Vol. 14, No. 5, pp. 413-428, 1978.
- [16] Richalet, J., *Industrial applications of model based predictive control*, Automatica, Vol. 29, pp. 1251-1274, 1993.
- [17] Stein, G., *Respect the unstable*. Bode lecture for being recipient of the 1989 Bode prize of the IEEE Control Systems Society, Proc. 28<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, Tampa, FL, 1989.
- [18] Cutler, C.R., B.L. Ramaker, *Dynamic matrix control - a computer control algorithm*. Proc. JACC, San Francisco, CA, 1980.
- [19] Angeli D., E. Mosca, *Command governors for constrained nonlinear systems*. IEEE Trans. Autom. Control, in corso di stampa.
- [20] Casavola, A., E. Mosca, *Robust reference governor for constrained uncertain linear system subject to input disturbances*, Proc. 35<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996.