Tạp chí Tin học và Điều khiển học, T. 17, S. 4 (2001), 23–27

ĐIỀU KHIỂN HỆ TUYẾN TÍNH KHOẢNG SỬ DỤNG LOGIC MỜ VÀ NGUYÊN LÝ TÁCH MÔ HÌNH

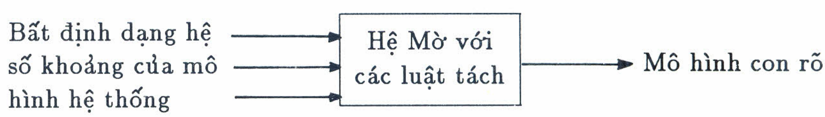
VŨ NHƯ LÂN, VŨ CHẤN HƯNG, ĐẶNG THÀNH PHU, BẠCH ĐÔNG NAM

Abstract. Using fuzzy logic and principle of separation of the dynamical models to design an algorithm of the optimal control for interval linear stochastic system with simple computations and useful properties for the applications in industry.

Tóm tắt. Sử dụng logic mờ và nguyên lý tách mô hình động học, xây dựng thuật toán điều khiển tối ưu hệ tuyến tính khoảng chịu nhiễu tác động với tính toán đơn giản và những tính chất có lợi cho các ứng dụng trong công nghiệp.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nguyên lý tách mô hình dựa trên ý tưởng *bất định khoảng là sự chập nhẫu nhiên của các mô hình con rõ* và có thể biểu diễn như hình dưới đây



Hình 1. Mỗi luật tương ứng với một mô hình

Điều khiển hệ chịu tác động nhiễu đã được nhiều tác giả giải quyết khá trọn vẹn. Để hướng đến các thuật toán điều khiển thông minh cho các dạng bất định khác nhau, bước đầu cần xem xét bài toán điều khiển với bất định nhiễu và bất định dưới dạng ma trận hệ số khoảng [7].

Xét hệ rời rạc:

$$x(k+1) = A(k)\,X(k) + B(k)\,U(k) + W(k), \tag{1.1}$$

$$Z(k) = H(k)\,X(k) + V(k), \tag{1.2}$$

trong đó:

$X(k) \in R^{n\times 1}$ vectơ trạng thái

với: kỳ vọng $E[X(0)] = \overline{X}(0)$, phương sai $\operatorname{cov}[X(0)] = P_2(0)$, (1.3)

$U(k) \in R^{m\times 1}$ vectơ điều khiển,

$Z(k) \in R^{r\times 1}$ vectơ quan sát,

$A(k) \in R^{n\times n}, \quad B(k) \in R^{n\times m}, \quad H(k) \in R^{r\times n};$ (1.4)

$W(k)$ và $V(k)$ là các chuỗi trắng, chuẩn độc lập với nhau và có các đặc trưng thống kê sau:

$$E[W(k)] = E[V(k)] = 0, \tag{1.5}$$

$$\operatorname{cov}[W(k), W(j)] = Q_2(k)\,\delta(k-j), \tag{1.6}$$

$$\operatorname{cov}[V(k), V(j)] = R_2(k)\,\delta(k-j), \tag{1.7}$$

$$\operatorname{cov}[W(k), V(j)] = \operatorname{cov}[W(k), X(0)] = \operatorname{cov}[V(k), X(0)] = 0. \tag{1.8}$$

Cần tìm điều khiển tối ưu theo nghĩa đảm bảo cực tiểu tiêu chuẩn sau đây:

$$J = E\Big\{\|X(N)\|_S^2 + \sum_{k=0}^{N-1}\big(\|X(k)\|_{Q_1(k)}^2 + \|U(k)\|_{R_1(k)}^2\big)\Big\}. \tag{1.9}$$

Nếu tất cả các ma trận $A(k), B(k), H(k)$ biết trước thì từ lý thuyết điều khiển như đã biết [2] tìm được điều khiển tối ưu dưới đây:

$$U(k) = -L(k)\,\widehat{X}(k/(k-1)). \tag{1.10}$$

Ở đây:

$$L(k) = \big[R_1(k) + B^T(k)\,M(k+1)\,B(k)\big]^{-1}\,B^T(k)\,M(k+1)\,A(k), \tag{1.11}$$

$$M(k) = A^T(k)\,M(k+1)\,A(k) + Q_1(k) - L^T(k)\,\big[R_1(k) + B^T(k)\,M(k+1)\,B(k)\big]\,L(k), \tag{1.12}$$

với điều kiện $M(N) = S$.

Ước lượng dự báo tối ưu:

$$\widehat{X}(k+1/k) = A(k)\,\widehat{X}(k/k-1) + B(k)\,U(k) + K(k)\,\big[Z(k) - H(k)\,\widehat{X}(k/k-1)\big] \tag{1.13}$$

với điều kiện ban đầu $\widehat{X}(1/0) = A(0)\,\overline{X}(0)$.

Hệ số Kalman

$$K(k) = A(k)\,P_2(k/k-1)\,H^T(k)\,\big[H(k)\,P_2(k/k-1)\,H^T(k) + R_2(k)\big]^{-1}. \tag{1.14}$$

Hiệp phương sai của sai số dự báo:

$$\begin{aligned} P_2(k+1/k) = {} & A(k)\,P_2(k/k-1)\,A^T(k) \\ & + A(k)\,P_2(k/k-1)\,H^T(k)\,\big[H(k)\,P_2(k/k-1)\,H^T(k) + R_2(k)\big]^{-1}. \\ & \;H(k)\,P_2(k/k-1)\,A^T(k) + Q_2(k) \end{aligned} \tag{1.15}$$

với điều kiện ban đầu $P(1/0) = A(0)\,P_2(0)\,A^T(0) + Q_2(0)$.

Khi hệ (1.1), (1.2) chứa bất định thể hiện ở các ma trận $A(k)$, $B(k)$, $H(k)$ là các ma trận hệ số khoảng với các phần tử khoảng thì hệ tuyến tính (1.1), (1.2) được gọi là hệ tuyến tính khoảng (interval linear system [5]). Thuật toán (1.10) đến (1.15) chứa các ma trận khoảng và các vectơ khoảng, ngoại trừ $x(0)$, $P_2(0)$, $Q_1(0)$, $Q_2(0)$, $R_1(0)$, $R_2(0)$ và S.

Về nguyên tắc sẽ tìm được điều khiển tối ưu với mọi a_{ij}^k, b_{ef}^k, h_{pq}^k nằm trong khoảng đã cho nhưng sẽ không tìm được điều khiển tối ưu nào có ý nghĩa cho toàn khoảng. Vấn đề đặt ra ở đây là phải tìm ra được điều khiển tối ưu liên kết mọi thông số của khoảng về mặt thông tin và có ý nghĩa đại diện trong toàn bộ khoảng đó. Chính vì vậy giải đáp đơn giản và hiệu quả là sử dụng logic mờ và nguyên lý tách mô hình xử lý bất định dưới dạng ma trận hệ số khoảng cho vấn đề điều khiển trên.

2. ĐIỀU KHIỂN SỬ DỤNG LOGIC MỜ

Xét hệ tuyến tính khoảng (1.1), (1.2). Giả sử rằng trên cơ sở phân tích thông tin tiên nghiệm về các dữ liệu ban đầu, có thể xây dựng được một số dạng hàm thuộc chuẩn, lồi trên các đại lượng khoảng của hệ (1.1), (1.2). Ví dụ dạng hàm thuộc tam giác, hình thang, hình chuông... Có thể chọn dạng hàm thuộc khác nhau cho các đại lượng khoảng.

2.1. Mờ hóa tại từng thời điểm k

Giả sử ma trận khoảng $A(k)$, $B(k)$, $H(k)$ có các phần tử khoảng tương ứng:

$$a_{ij}^k \in \big[a_{ij}^k(-),\, a_{ij}^k(+)\big], \qquad i = \overline{1,\,n},\ \ j = \overline{1,\,n}$$

$$b_{ef}^k \in \big[b_{ef}^k(-),\, b_{ef}^k(+)\big], \qquad e = \overline{1,\,m},\ \ f = \overline{1,\,n}$$

$$h_{pq}^k \in \left[h_{pq}^k(-),\, h_{pq}^k(+)\right], \qquad p=\overline{1,r},\; q=\overline{1,n}$$

Trên các khoảng đó, xây dựng các tập mờ $A_{ij}^{la}(k)$, $B_{ef}^{lb}(k)$, $H_{pq}^{lh}(k)$ tại từng thời điểm k như sau:

$$A_{ij}^{la}(k) = \left\{a_{ij}^k,\, \mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k) \mid a_{ij}^k \in R,\, \mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k) : R \to [0,\,1]\right\}$$

$$B_{ef}^{lb}(k) = \left\{b_{ef}^k,\, \mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k) \mid b_{ef}^k \in R,\, \mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k) : R \to [0,\,1]\right\}$$

$$H_{pq}^{lh}(k) = \left\{h_{pq}^k,\, \mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k) \mid h_{pq}^k \in R,\, \mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k) : R \to [0,\,1]\right\}$$

Ở đây $\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k)$, $\mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k)$ và $\mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k)$ là các hàm chuẩn lồi,

Gọi $la_{ij} = \overline{1, Ma_{ij}}$, Ma_{ij} - số tập mờ của phần tử khoảng a_{ij}^k,

$lb_{ef} = \overline{1, Mb_{ef}}$, Mb_{ef} - số tập mờ của phần tử khoảng b_{ef}^k,

$lh_{pq} = \overline{1, Mh_{pq}}$, Mh_{pq} - số tập mờ của phần tử khoảng h_{pq}^k.

2.2. Suy luận mờ tại từng thời điểm k

Luật $R^l(k)$ IF–THEN mờ tại từng thời điểm k - thể hiện nguyên lý tách mô hình:

IF a_{ij}^k is $A_{ij}^{la}(k)$ AND b_{ef}^k is $B_{ef}^{lb}(k)$ AND h_{pq}^k is $H_{pq}^{lh}(k)$

THEN

$$X_l(k+1) = A(\mu,\, k)\, X_l(k) + B(\mu,\, k)\, U_l(k) + W(k), \tag{2.1}$$

$$Z_l(k) = H(\mu,\, k)\, X_1(k) + V(k). \tag{2.2}$$

Trong đó: $l = \overline{1, M}$, $M = \prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{n} Ma_{ij} \prod_{e=1}^{m}\prod_{f=1}^{n} Mb_{ef} \prod_{p=1}^{r}\prod_{q=1}^{n} Mh_{pq}$ và trường hợp các ma trận đơn giản nhất có thể là:

$$A(\mu,\, k) = \left[\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k)\, a_{ij}^k\right], \tag{2.3}$$

$$B(\mu,\, k) = \left[\mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k)\, b_{ef}^k\right], \tag{2.4}$$

$$H(\mu,\, k) = \left[\mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k)\, h_{pq}^k\right]. \tag{2.5}$$

Như vậy tại thời điểm k, điều khiển tối ưu $U_l(k)$ hệ (2.1), (2.2) tìm được trên cơ sở (1.10) đến (1.15).

2.3. Giải mờ tại thời điểm k

Điều khiển tối ưu tổng hợp có dạng:

$$U(k) = \frac{\sum\limits_{l=1}^{M} \alpha_l\, U_l(k)}{\sum\limits_{l=1}^{M} \alpha_l}, \quad 0 \le \alpha_l \le 1, \tag{2.6}$$

trong đó α_l tùy chọn.

Tính chất 1.

Gọi $U_{\min}(k) = \min\{U_1(k),\, U_2(k), \ldots, U_M(k)\}$,

$U_{\max}(k) = \max\{U_1(k),\, U_2(k), \ldots, U_M(k)\}$.

Khi đó
$$U_{\min}(k) \le U(k) \le U_{\max}(k). \tag{2.7}$$

Hệ quả 1. *Khi* $\alpha_1 = \alpha_2 = \ldots = \alpha_M = 1$, *từ (2.7) nhận được:*

$$U_{\min}(k) < U(k) < U_{\max}(k). \tag{2.8}$$

Hệ quả 2. *Gọi*

$J_{\min}(k) = \min\{J(U_1(k)),\, J(U_2(k)), \ldots, J(U_M(k))\}$,

$J_{\max}(k) = \max\{J(U_1(k)),\, J(U_2(k)), \ldots, J(U_M(k))\}$, *từ (2.7) suy ra:*

$$J_{\min}(k) \le J(U(k)) \le J_{\max}(k). \tag{2.9}$$

Tính chất 2. Giả sử do sai số tính toán, thu được:

$$U_l'(k) = U_l(k) + \Delta U_i(k),$$

dẫn đến

$$U'(k) = U(k) + \Delta U(k).$$

Gọi

$$\Delta U_{\min}(k) = \min\{|\Delta U_1(k)|, |\Delta U_2(k)|, \dots, |\Delta U_M(k)|\},$$

$$\Delta U_{\max}(k) = \max\{|\Delta U_1(k)|, |\Delta U_2(k)|, \dots, |\Delta U_M(k)|\},$$

$|\cdot|$ - giá trị tuyệt đối. Khi đó:

$$\Delta U_{\min}(k) \le |\Delta U(k)| \le \Delta U_{\max}(k). \tag{2.10}$$

3. HÀM THUỘC VỚI CÁC THÔNG SỐ TỐI ƯU

Sử dụng logic mờ trong các bài toán điều khiển [3, 7] nhìn chung không đưa ra cách chọn các thông số hàm thuộc. Vì vậy phần nào hạn chế độ chính xác của điều khiển. Để khắc phục khó khăn này cần xác định các thông số hàm thuộc theo một tiêu chuẩn tối ưu nào đó. Giả sử chọn hàm Gauss cho toàn bộ các khoảng. Gọi:

$\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k)$ là hàm thuộc Gauss với 2 thông số $a_{ij}^{la}, \sigma_{ij}^{la}$,

$\mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k)$ là hàm thuộc Gauss với 2 thông số $b_{ef}^{lb}, \sigma_{ef}^{lb}$,

$\mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k)$ là hàm thuộc Gauss với 2 thông số $h_{pq}^{lh}, \sigma_{pq}^{lh}$.

Như vậy có thể biểu diễn (2.1), (2.2) dưới dạng

$$X_l(k+1) = A\big(\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^{la}, \sigma_{ij}^{la}), k\big)\, X_l(k) + B\big(\mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^{lb}, \sigma_{ef}^{lb}), k\big)\, U_l(k) + W(k), \tag{31}$$

$$Z_l = H\big(\mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^{lh}, \sigma_{pq}^{lh}), k\big)\, X_l(k) + V(k). \tag{3.2}$$

Ở đây

$$A(\cdot) = \big[\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k, a_{ij}^{la}, \sigma_{ij}^{la})\, a_{ij}^k\big], \tag{3.3}$$

$$B(\cdot) = \big[\mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k, b_{ef}^{lb}, \sigma_{ef}^{lb})\, b_{ef}^k\big], \tag{3.4}$$

$$H(\cdot) = \big[\mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k, h_{pq}^{lh}, \sigma_{pq}^{lh})\, h_{pq}^k\big]. \tag{3.5}$$

Có nhiều phương pháp nhận dạng thông số hệ (3.1), (3.2) như lọc Kalman mở rộng xấp xỉ ngẫu nhiên, bình phương cực tiểu hoặc sử dụng mạng nơron, thuật toán di truyền [1, 4].

Tùy trường hợp cụ thể mà sử dụng phương pháp nhận dạng thông số hàm thuộc cho thích hợp.

4. THUẬT TOÁN CHUNG ĐIỀU KHIỂN HỆ KHOẢNG SỬ DỤNG LOGIC MỜ VÀ NGUYÊN LÝ TÁCH MÔ HÌNH

Tại từng thời điểm k, với các đại lượng ban đầu: N, $\overline{X}(0)$, $P_2(0)$, $Q_1(k)$, $Q_2(k)$, $R_1(k)$, $R_2(k)$, $\alpha_l(k)$, $a_{ij}(-)$, $a_{ij}(+)$, $b_{ef}(-)$, $b_{ef}(+)$, $h_{pq}(-)$, $h_{pq}(+)$, thực hiện các bước sau:

Bước 1:

Tạo các đại lượng ngẫu nhiên phân bố đều a_{ij}^k, b_{eg}^k, h_{pq}^k đối với các khoảng.

Bước 2:

Trên cơ sở hàm thuộc đã được chọn (tam giác, hình thang, hình chuông), xác định được:

$$\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k, \theta_{ij}^{la}),\quad \mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k, \theta_{ef}^{lb}),\quad \mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k, \theta_{pq}^{lh}),$$

trong đó $\theta_{(\cdot)}^{(\cdot)}$ là vectơ tham số hàm thuộc.

Bước 3:

Từ luật $R^l(k)$ tìm điều khiển tối tưu hệ (3.1), (3.2) sử dụng các biểu thức (1.10) đến (1.15) cực tiểu hàm mục tiêu (1.9). Nhận được $U_l(k)$, $l = \overline{1, M}$.

Xác định điều khiển tối ưu tổng hợp $U(k)$ theo (2.6).

Bước 4:

Tối ưu hóa thông số hàm thuộc $\theta_{(\cdot)}^{(\cdot)}$ bằng một trong những phương pháp nhận dạng thích hợp [1], nhận được:

$$\mu_{ij}^{la}(a_{ij}^k, \theta_{ij}^{*la}),\ \mu_{ef}^{lb}(b_{ef}^k, \theta_{ef}^{*lb}),\ \mu_{pq}^{lh}(h_{pq}^k, \theta_{pq}^{*lh}).$$

Bước 5:

Quay trở lại thực hiện bước 2, và bước 3. Kết quả nhận được điều khiển tối ưu với thông số hàm thuộc tối ưu $U_l^*(k)$ của từng luật $R^l(k)$ và xác định được điều khiển tối ưu tổng hợp $U^*(k)$ theo (2.6).

5. KẾT LUẬN

Vấn đề điều khiển hệ tuyến tính có thể sử dụng công cụ lý thuyết điều khiển bền vững (robust control) hoặc điều khiển trong chế độ trượt (sliding mode). Song chắc chắn sẽ phức tạp vì ma trận hệ số khoảng thường được phân rã thành đa thức với hệ số khoảng chưa biết. Như vậy sẽ dẫn đến việc giải phương trình Riccati bị biến dạng và bài toán tối ưu dạng *sup min* không đơn giản [5]. Ở đây đưa ra một quan điểm khác dựa trên ý tưởng *bất định khoảng là sự chập ngẫu nhiên của các mô hình động học con*. Đây là *nguyên lý tách mô hình động học*. Từ đây có thể sử dụng logic mờ, xây dựng thuật toán điều khiển cho phép xác định điều khiển tối ưu mạng thông tin về toàn khoảng có ý nghĩa là điều khiển tối ưu đại diện trong điều kiện bất định dưới dạng ma trận hệ số khoảng trong hệ tuyến tính có nhiễu tác động. Trong trường hợp sử dụng thuật toán một cách đơn giản có thể bỏ qua bước 4 và bước 5. Thuật toán đề xuất không bị hạn chế khi sử dụng cho các hệ phi tuyến với vectơ thông số bất định dưới dạng khoảng. Như vậy rất thuận tiện cho các ứng dụng trong công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Anass B. et al., Nonlinear dynamic system identification, *Int. J. of Control* **72** (7-8) (1999) 591–602.

[2] C. H. Houpic, G. B. Lamont, *Digital Control System: Theory, Hardware, Software*, McGraw-Hill, series in electrical engineering, Control Theory, 1992.

[3] Hao Ying, The Takagi–Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable Gain controllers, *Automatica* **34** (2) (1998) 157–167.

[4] L. X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, 1994.

[5] T. E. Djaferis, *Robust Control Design*, Kluwer Academic Publichers, 1995.

[6] Vũ Như Lân, Vũ Chấn Hưng, Đặng Thành Phu, Thiết kế mờ nhận dạng hệ thống tối ưu, *Khoa học và Công nghệ* **39** (4) (2001) 12–19.

[7] Yen I. R. Langari and Zadeh L. A. (eds), *Industrial Applications of Fuzzy Control and Intelligent Systems*, IEEE Press, New York, 1995.

Nhận bài ngày 28 - 2 - 2001
Nhận lại sau khi sửa ngày 14 - 4 - 2001

Viện Công nghệ thông tin.