

ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI KẾT HỢP CÁC BỘ QUAN SÁT CHO ROBOT CÓ CÁC KHỚP NỐI MỀM

ALGORITHMS FOR FLEXIBLE JOINTS MANIPULATOR USING ADAPTIVE OBSERVER

Võ Thu Hà^{1,*}, Võ Quang Lạp¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.135>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày ứng dụng điều khiển thích nghi dùng các bộ quan sát cho Robot có khớp nối mềm. Trong bộ điều khiển này mục tiêu đặt ra là phải quan sát được các biến tổng thể có thông số bất định đầu vào và xét thêm ảnh hưởng nhiễu nội tại các khớp, chính vì vậy cần phải bổ sung thêm một hàm nhiễu tác động xen kênh của các khớp khác trong bộ quan sát với bộ quan sát trượt SMO, bộ quan sát HGO và bộ điều khiển LQR sẽ làm cho hệ chuyển động của robot các khớp nối mềm ổn định và bền vững với nhiễu.

Từ khóa: Bộ quan sát trượt SMO, bộ quan sát HGO, tiêu chuẩn Lyapunov, khớp nối mềm.

ABSTRACT

This work proposes an adaptive control application for flexible joint manipulator employing observers. An interstitial noise function must be added since the objective of this controller is to watch the overall variables with input uncertainty parameters and take into account the interference effects of the joints. The state feedback controller in conjunction with channels from other joints in the observer, such as the SMO sliding observer and the HGO big gain observer, will give the robot's motion system flexible joints. steady as well as interference-free.

Keywords: Sliding - mode observers, high gain observer (HGO), Lyapunov, flexible joint manipulator.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: vtha@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/7/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Khi tính toán mô hình động lực học cho hệ truyền động các khớp nối sau của robot, trong thực tế chỉ đo được các góc động cơ còn các góc khớp không xác định được chính xác để tính toán vì hệ truyền động các khớp nối sau này có đặc điểm: công suất nhỏ, kích thước các khớp nối này bị hạn chế (10cm) cho nên sự kết nối từ động cơ đến khớp trong một không gian hạn hẹp hình trụ, thông thường với khoảng cách lớn để nối giữa động cơ và khớp người ta dùng đai thang điều này dẫn đến hệ hoạt động với hai khối quán tính

khác nhau và mômen quán tính động cơ rất nhỏ so với mômen quán tính khớp đó là nguyên nhân tạo ra không cứng vững ở khớp nối, do đó vị trí động cơ không trùng với vị trí khớp gây ra sự dao động trong quá trình chuyển động làm giảm độ bám quỹ đạo chính xác của hệ chuyển động tay máy. Để nâng cao độ bám quỹ đạo chính xác, trong bài báo đề xuất một số giải pháp điều khiển đối với hệ thống điều khiển chuyển động robot với những khớp nối mềm là dùng các bộ quan sát SMO và HGO để quan sát ước lượng các góc khớp [1-4].

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CHO ROBOT CÓ KHỚP NỐI MỀM

Mối quan hệ giữa động cơ và khớp robot có khớp thứ i , biểu diễn dưới dạng phương trình [2]:

$$\begin{cases} M\ddot{q} + H + G(q) + K.(q - \theta) = 0 \\ J\ddot{\theta} + K(q - \theta) = T_m \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

K - Hệ số cứng của khớp.

J - Moment quán tính động cơ.

Từ (1), xác định:

$$\begin{cases} \ddot{q} = -M^{-1}[H + g] - M^{-1}K.(q - \theta) \\ \ddot{\theta} = -\frac{K}{J}(\theta - q) + \frac{T_m}{J} \end{cases} \quad (2)$$

Đặt các biến trạng thái:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in R^{4n}$$

Vector biến vào: $u = T_m$ (moment động cơ). Viết hệ phương trình trạng thái cho khớp thứ i :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{K}{J}(x_1 - x_3) + \frac{T_m}{J} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -M(x_3)^{-1}K(x_3 - x_1) - M(x_3)^{-1}[H(x_3, x_4) + G(x_3)] \end{cases} \quad (3)$$

Viết dưới dạng tổng quát:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ x_4 \\ f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, u) \end{bmatrix}, y = [1 \ 0 \ 0 \ 0]x \quad (4)$$

Có nhiều cách đưa hệ phương trình (1) về dạng phương trình trạng thái chuẩn:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x) + Bu \quad (5)$$

Tuy nhiên ta chọn cách chuyển với:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K}{J} & 0 & \frac{K}{J} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ 0 \\ x_3 + x_4 \\ (M(x_3)^{-1}K(x_1 - x_3) + x_4 - M(x_3)^{-1}(H(x_3, x_4) + G(x_3))) \end{bmatrix}$$

Giả thiết đo được vị trí của động cơ θ được đặt là $y = x_1$.

Với $\hat{f}(x)$ thành phần phi tuyến ước lượng của $f(x)$:

$$\hat{f}(\hat{x}) = \begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ 0 \\ \hat{x}_3 + \hat{x}_4 \\ (M(\hat{x}_3)^{-1}K(\hat{x}_1 - \hat{x}_3) + \hat{x}_4 - M(\hat{x}_3)^{-1}(H(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + G(\hat{x}_3))) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sao cho khả năng để có: $|f(x) - \hat{f}(\hat{x})| < \delta$.

3. BỘ QUAN SÁT TRƯỢT (SMO)

Cho hệ thống phi tuyến sau đây [1, 2]:

$$\dot{X} = A.X + B.u \quad (7)$$

$$Y = C.X \quad (8)$$

Trong đó:

$x(t) \in R^n$ - Biến trạng thái của hệ thống, $y(t) \in R^p$ - Biến đầu ra, $u(t) \in R^m$ - Tín hiệu điều khiển đầu vào của hệ thống phi tuyến, $A \in R^{n \times n}$ - Ma trận trạng thái, $B \in R^{n \times m}$ - Ma trận điều khiển,

$C \in R^{p \times n}$ - Ma trận đầu ra, $f(x, t)$ - Hàm phi tuyến.

Cấu trúc bộ quan sát trượt được đề xuất [1, 2], như sau:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \hat{f}(\hat{x}, t) + Bu - Ls - K * \text{sgn}(s) \quad (9)$$

Trong đó:

L - ma trận quan sát Luenberger, K - ma trận phản hồi trạng thái của bộ quan sát trượt,

$\hat{f}(\cdot)$ - Thành phần phi tuyến ước lượng của $f(\cdot)$ và s - vectơ các mặt trượt.

Mặt trượt s được xác định bởi:

$$s = \hat{y} - y = C\tilde{x} \quad (10)$$

Với thành phần sai lệch ước lượng \tilde{x} xác định bởi:

$$\tilde{x} = \hat{x} - x \quad (11)$$

$$\text{sgn}(s) = \tilde{y} = [\text{sgn}(s_1), \dots, \text{sgn}(s_p)]^T \in R^p \quad (12)$$

Từ (7) và (9), phương trình động học mô tả sai lệch của bộ quan sát trượt như sau:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + \Delta f - Ls - K * \text{sgn}(s) \quad (13)$$

Trong đó:

$\Delta f = f(x, t) - \hat{f}(\hat{x}, t)$ - các thông số không biết của đối tượng phi tuyến được giả thiết là hàm bị chặn trên với điều kiện: $|\Delta f| \leq \delta$

Chọn hàm: $v = \frac{1}{2}s^T s$.

Nếu $\text{rank}(C) = p$ thì V là hàm xác định dương.

Ta phải làm cho $\dot{v} \leq 0$, nghĩa là:

$$\dot{v} = s^T \dot{s} < -\eta|s| < 0 \quad (14)$$

Trong đó, η là hằng số dương.

Để (14) được thỏa mãn thì sai lệch trạng thái của hệ thống luôn được đưa về trên mặt trượt $s = 0$ và giữ trên đó, tức là $\dot{s} = 0$:

$$\dot{s} = C(A\tilde{x}(t) + \Delta f - K * \text{sgn}(s)) = 0 \quad (15)$$

$$\Rightarrow \text{sgn}(s) = (CK_s)^{-1}C(\Delta f + A\tilde{x}(t)) \quad (16)$$

Vi vậy một hệ thống luôn được đưa về trên mặt trượt $s = 0$ với phương trình (13) và (16) thì xác định được phương trình động học mô tả sai lệch như sau:

$$\dot{\tilde{x}} = (I - K_s(CK_s)^{-1}C)(\Delta f + A\tilde{x}(t)) \quad (17)$$

Điều kiện để tồn tại (17) là $\text{Rank}(K_s) = p$.

Theo (15), bộ quan sát trượt SMO ứng dụng cho robot có khớp nối mềm như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - L_1 s - k_1 \text{sgn}(s) \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{K}{J}(\hat{x}_1 - \hat{x}_3) + \frac{u}{J} - L_2 s - k_2 \text{sgn}(s) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \hat{x}_4 - L_3 s - k_3 \text{sgn}(s) \\ \dot{\hat{x}}_4 = -M(\hat{x}_3)^{-1} [H(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + G(\hat{x}_3)] \\ \quad - M(\hat{x}_3)^{-1} K(\hat{x}_3 - \hat{x}_1) - L_4 s - k_4 \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó:

$$K_s = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]^T \in R^{4 \times n}, L = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4]^T \in R^{4 \times n}$$

$$s = \tilde{y} = \hat{y} - y = \hat{x}_1 - \theta$$

- Xác định hệ số ma trận L thông qua cân bằng phương trình đặc tính với phương trình chứa nhiều điểm cực cần tìm. Xác định hệ số ma trận K_s , [1, 2]. Với giả thiết đo được vị trí động cơ $y = x_1$.

Mặt trượt s được xác định:

$$s = \hat{x}_1 - x_1 \quad (19)$$

Sai lệch trên mặt trượt ước lượng với mặt trượt của đối tượng:

$$\dot{s}_1 = \dot{\hat{x}}_1 - \dot{x}_1 = \dot{\hat{x}}_2 - L_1 \tilde{x}_1 - k_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1) - x_2 = \tilde{x}_2 - L_1 \tilde{x}_1 - k_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1) \quad (20)$$

Thay (21) vào $s_1 \dot{s}_1 \leq -\eta |s_1|$ ta được:

$$\tilde{x}_1 (\tilde{x}_2 - L_1 \tilde{x}_1 - k_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1)) \leq -\eta |\tilde{x}_1| \quad (21)$$

$$k_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1) \geq \frac{-\eta |\tilde{x}_1|}{\tilde{x}_1} + \tilde{x}_2 - L_1 \tilde{x}_1 \quad (22)$$

Đặt: $\frac{|\tilde{x}_1|}{\tilde{x}_1} = \text{sgn}(\tilde{x}_1) \Rightarrow \frac{\tilde{x}_1}{\text{sgn}(\tilde{x}_1)} = |\tilde{x}_1|$ (23)

Thay (23) vào (22) ta được:

$$k_1 \text{sgn}(\tilde{x}_1) \geq \eta \text{sgn}(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_2 - L_1 \tilde{x}_1 \quad (24)$$

Chia 2 vế (23) cho $\text{sgn}(\tilde{x}_1)$ ta được:

$$k_1 \geq \eta + \frac{\tilde{x}_2}{\text{sgn}(\tilde{x}_1)} - L_1 |\tilde{x}_1| \quad (25)$$

Khai triển phương trình động học mô tả sai lệch của bộ quan sát khi tìm được hệ số K_s :

$$\dot{\tilde{x}} = (I - K(CK)^{-1}C)(\Delta f + A\tilde{x}(t))$$

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_2}{k_1} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_3}{k_1} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_4}{k_1} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \Delta f_2 \\ \tilde{x}_4 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Viết lại (26) tách phần nhiễu loạn:

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_2}{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_3}{K_1} & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_4}{K_1} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_2 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Trong đó: $\Delta f_2, \Delta f_4$ - Thông số nhiễu loạn, $\Delta f_2 = \hat{f}_2 - f_2, \Delta f_4 = \hat{f}_4 - f_4$

Xác định được các hệ số còn lại ma trận K_s từ (27):

$$k_2 = k_1 \frac{\Delta f_2}{\tilde{x}_2} \quad (28)$$

$$k_3 = k_1 \frac{\tilde{x}_4}{\tilde{x}_2} \quad (29)$$

$$k_4 = k_1 \frac{\Delta f_4}{\tilde{x}_2} \quad (30)$$

Trong đó, các giới hạn cận trên $\Delta f_2, \Delta f_4, \tilde{x}_2, \tilde{x}_4$ được lựa chọn. Tuy nhiên k_3, k_4 có thể chọn bằng không thì bộ quan sát trạng thái vẫn đảm bảo ổn định.

4. BỘ QUAN SÁT HGO

Cho một hệ phi tuyến sau [3, 4]:

$$\dot{X} = f(X), X \in \mathbb{R}^n, y_i = h_i(X), 1 \leq i \leq s \quad (31)$$

Quan sát các biến trạng thái cần phải thỏa mãn điều kiện: $\text{rank}[dh_1(X), \dots, d(L_f^{k_i-1}h_i(X)) : 1 \leq i \leq s] = n, \forall X \in \mathbb{R}^n$ (32)

Trong trường hợp trong số n trạng thái, bộ quan sát HGO (33), như sau:

$$\dot{\hat{x}} = K_0 \tilde{x}_p + \hat{F}(x_0) + \hat{G}(x_0)\tau \quad (33)$$

Với:

$$\hat{X} = [\hat{\theta}^T, \hat{\theta}^T, \hat{\Delta}^T, \hat{\Delta}^T]^T \text{ - Các biến trạng thái ước lượng.}$$

$$X_0 = [\theta^T, \theta^T, \Delta^T, \Delta^T]^T \text{ - Các biến trạng thái thực.}$$

$\tilde{X}_p = [(\theta^T - \hat{\theta}^T), (\theta^T - \hat{\theta}^T)]^T$ - Sai lệch giữa các biến trạng thái ước lượng và thực.

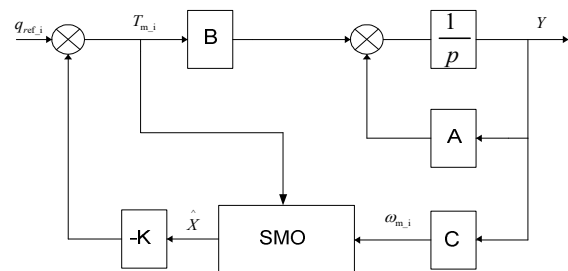
$$\Rightarrow \tilde{X} = X - \hat{X} = [(\theta^T - \hat{\theta}^T), (\Delta^T - \hat{\Delta}^T), (\Delta^T - \hat{\Delta}^T), (\theta^T - \hat{\theta}^T)]^T$$

$$= [\tilde{\theta}^T, \tilde{\Delta}^T, \tilde{\theta}^T, \tilde{\Delta}^T]^T \quad (34)$$

Kết hợp với phương trình (34) với phương trình (33) [3]:

$$\dot{\tilde{X}} = (G(X))\tau - K_0 \tilde{X}_p + (F(X) - \hat{F}(X_0)) \quad (35)$$

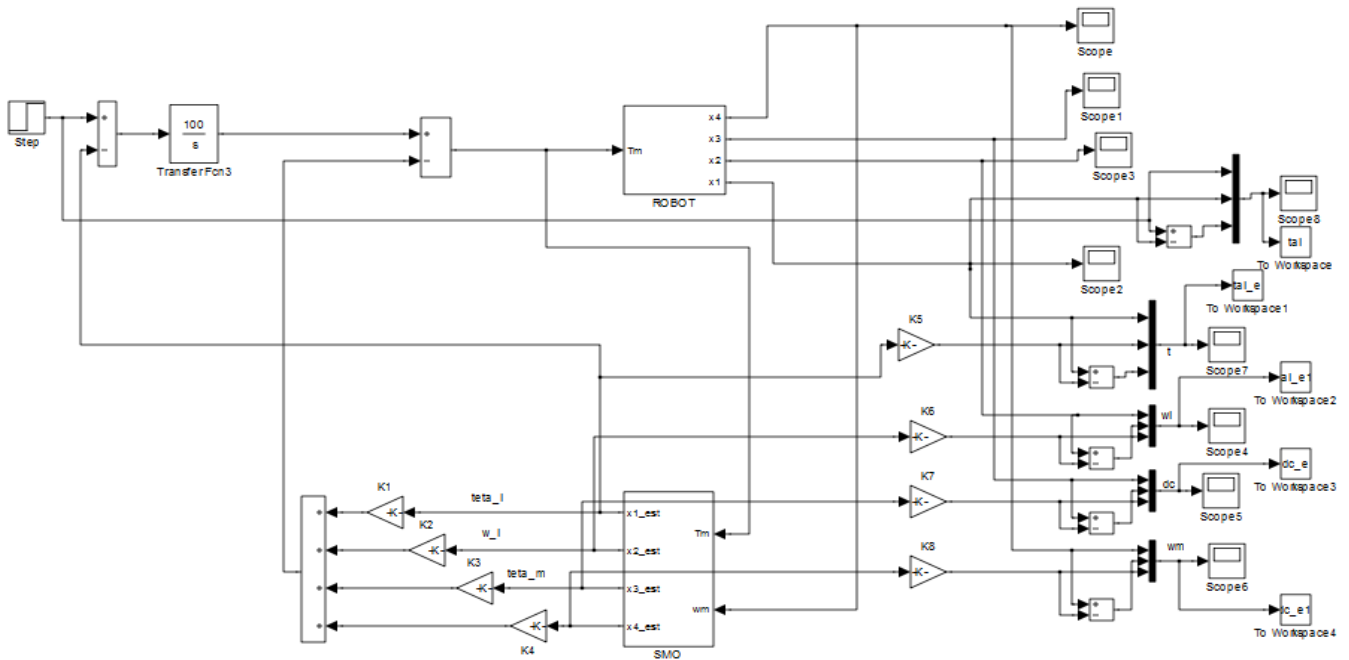
5. MÔ PHỎNG BỘ QUAN SÁT TRƯỢT (SMO) CHO ROBOT CÓ KHỚP NỐI MỀM



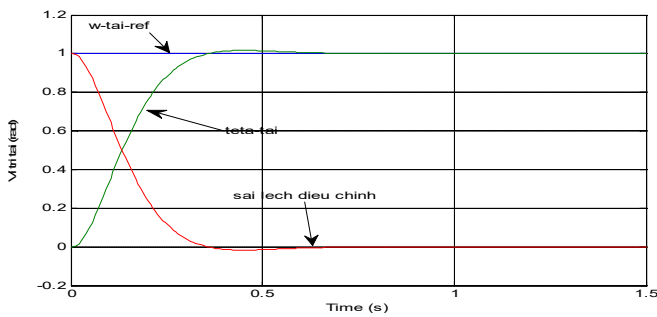
Hình 1. Sơ đồ cấu trúc điều khiển LQR và SMO

Trong sơ đồ cấu trúc (hình 1), bộ điều khiển LQR và bộ quan sát trượt có khả năng quan sát được các trạng thái qua biến khớp, góc quay động cơ, vị trí khớp và động cơ. Bộ quan sát trượt có nhiệm vụ thực hiện ước lượng trạng thái chính xác còn bộ điều khiển LQR tối thiểu hoá hàm tổn thất năng lượng để trạng thái của hệ thống chuyển từ trạng thái nào đó về trạng thái cân bằng.

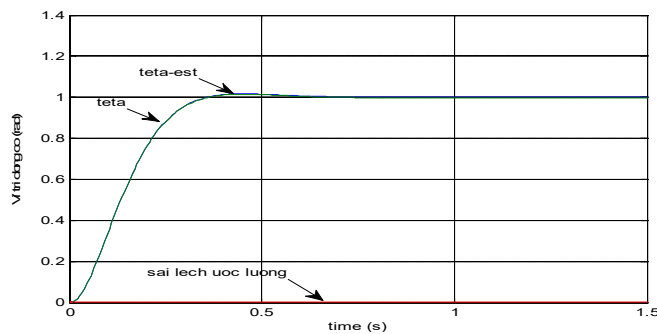
Các thông số như sau: $B_M = 0,6 \text{ Nms/rad}; J_M = 0,0013 \text{ Nms}^2/\text{rad}; B_L = 0,005 \text{ Nms/rad}; J_L = 0,0013 \text{ Nms}^2/\text{rad}; K = 43 \text{ Nm/rad}$, tỷ số truyền $i = 105$. Từ hệ phương trình trạng thái ta có cấu trúc mô phỏng cho một khớp robot sử dụng Matlab/Simulink kết hợp với toolbox Simechanics.



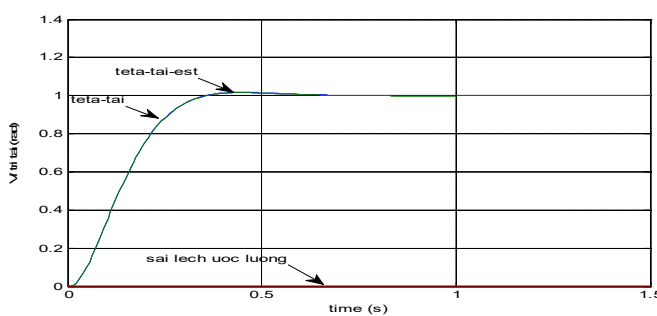
Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển LQR và SMO



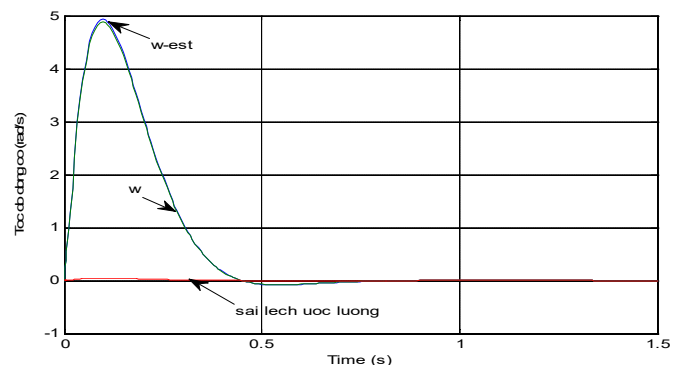
Hình 3. Biểu diễn góc tải và góc tải đặt



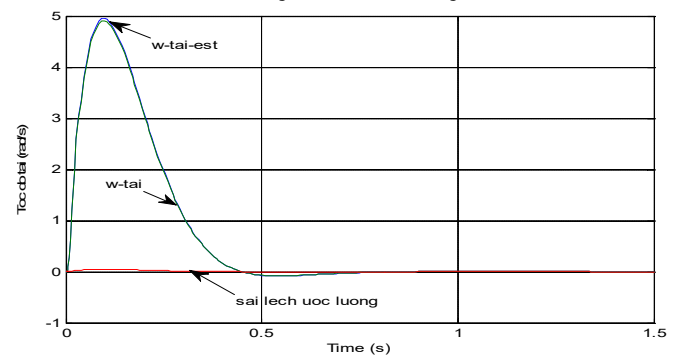
Hình 4. Biểu diễn góc động cơ thực và ước lượng



Hình 5. Biểu diễn góc khớp thực và ước lượng



Hình 6. Biểu diễn tốc độ động cơ thực và ước lượng

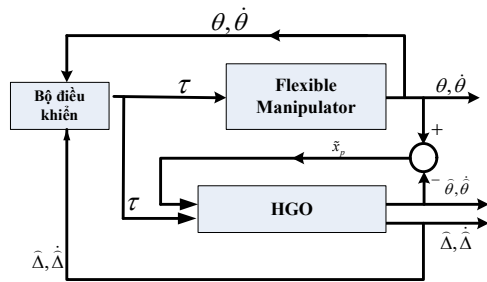


Hình 7. Đáp ứng tốc độ khớp thực và ước lượng

6. MÔ PHỎNG BỘ QUAN SÁT HGO CHO ROBOT CÓ KHỚP NỐI MỀM

Cấu trúc điều khiển của bộ điều khiển phản hồi trạng thái [3, 4, 5] như hình 8.

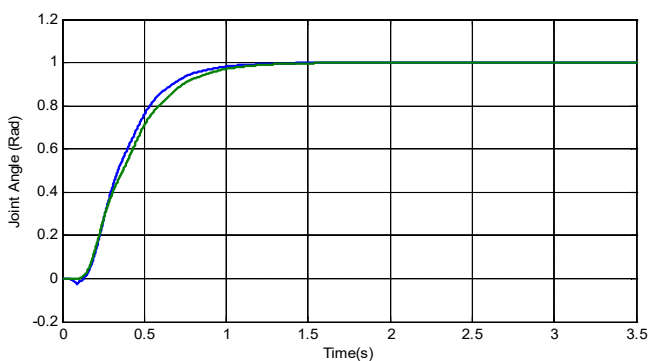
Các thông số như sau: $B_M = 0,6 \text{ Nms/rad}$; $J_M = 0,0013 \text{ Nms}^2/\text{rad}$; $B_L = 0,005 \text{ Nms/rad}$; $J_L = 0,0013 \text{ Nms}^2/\text{rad}$; $K = 43 \text{ Nm/rad}$, tỷ số truyền $i = 105$. Từ hệ phương trình trạng thái ta có cấu trúc mô phỏng cho một khớp robot sử dụng Matlab/Simulink kết hợp với toolbox Simechanics, với thông số như bảng 1.



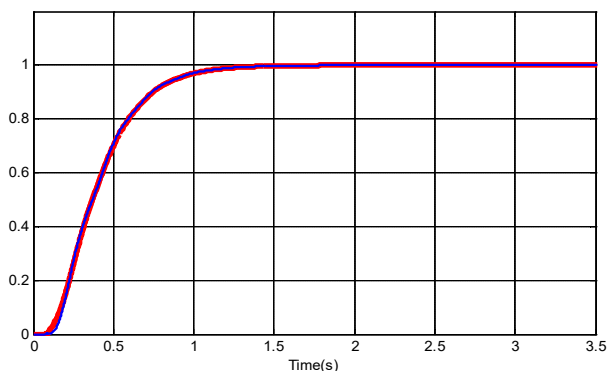
Hình 8. Cấu trúc bộ điều khiển phản hồi trạng thái với bộ quan sát HGO

Bảng 1. Thông số mô phỏng

Tham số	Giá trị
K_p	250
K_v	$3\sqrt{250}$
K_Δ	55
$K_{\Delta\Delta}$	$3\sqrt{55}$
K_0	$\begin{bmatrix} 450 & 450 & 450 & 450 \\ 450 & 450 & 450 & 450 \end{bmatrix}^T$



Hình 9. Vị trí tải thực và vị trí khớp ước lượng



Hình 10. Đáp ứng vị trí tải và vị trí động cơ

Nhận xét: Theo kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 9, 10 ta thấy, đáp ứng vị trí tải và vị trí động cơ hệ điều khiển phản hồi trạng thái dùng bộ quan sát trượt HGO bám sát nhau.

7. KẾT LUẬN

Qua lý thuyết và kết quả mô phỏng cho thấy, dùng bộ quan sát trượt để ước lượng các góc khớp nối mềm đã đảm

bảo được vị trí khớp thực bám sát vị trí khớp ước lượng và đảm bảo được vị trí khớp thực bám sát vị trí khớp đặt với sai số nhỏ hơn 0,1%. Để kiểm tra đặc tính động của hệ truyền động các khớp nối mềm, bộ điều khiển phản hồi trạng thái dùng bộ quan sát SMO, HGO để ước lượng góc khớp để kiểm tra động của khâu quan sát trượt ước lượng góc tải, thấy rằng: hệ ổn định, đảm bảo chất lượng bám quỹ đạo chính xác. Với sự chứng minh thuật toán điều khiển, cho thấy thuật toán điều khiển này có tính khả thi tốt với dung lượng tính toán nhỏ, phù hợp ứng dụng cho lớp đối tượng là các hệ truyền động tay máy công nghiệp có khớp nối mềm không những đòi hỏi giảm được dao động trong quá trình chuyển động mà còn đạt được độ chính xác cao về chất lượng điều khiển trong giải điều chỉnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Frank L. Lewis, Darren M. Dawson, Chaouki T. Abdallah, 2004. *Robot manipulator control theory and practice, Second Edition, Revised and Expanded*. University of Texas at Arlington Arlington, Texas, U.S.A. Clemson University Clemson, South Carolina, U.S.A. University of New Mexico Albuquerque, New Mexico, U.S.A.
- [2]. Mohsin Waqar, 2008. *Robust nonlinear observer for a non-collocated flexible motin system*. Georgia Institute of Technology.
- [3]. Ali Reza Sahab, Mohammad Reza Modabbernia, 2011. *Backstepping control for a single - link flexible - joint manipulator using genetic algorithm*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control Vol. 7, No. 7(B).
- [4]. Mohsin Waqar, 2008. *Robust nonlinear observer for a non-collocated flexible motion system*. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Masters of Science in the George W. Woodruff School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology.
- [5]. Dezhi Kong, Wendong Wang, Yang Wang, Junbo Zhang, Yikai Shi, Lingyun KN., 2021. *Spiking-free HGO-based DSC for flexible joint manipulator*. Chinese Journal of Aeronautics, Volume 35, Issue 3.

AUTHORS INFORMATION

Vo Thu Ha, Vo Quang Lap

Faculty of Electrical Engineering, University of Economics - Technology for Industries, Hanoi, Vietnam