

XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI CHO ROBOT ALMEGA 16

BUILDING EXPERIMENTAL MODEL OF ROBUST ADAPTIVE CONTROL FOR ROBOT ALMEGA 16

Võ Thu Hà

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

Đến Tòa soạn ngày 08/01/2022, chấp nhận đăng ngày 08/03/2021

Tóm tắt: Bài báo đề cập đến vấn đề xây dựng thuật toán điều khiển bền vững thích nghi trong không gian khớp cho robot Almega 16. Mục đích của thuật toán điều khiển là kết hợp các ưu điểm và hạn chế được nhược điểm của bộ điều khiển thích nghi và bộ điều khiển bền vững. Bộ điều khiển này không yêu cầu biết chính xác các thông số động lực học của hệ thống được giải quyết bằng việc ước lượng các thông số đó vì vậy giảm thiểu khối lượng tính toán on-line đồng thời đảm bảo ổn định tiệm cận khi thêm nhiễu ngoại tác động. Kết quả được mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hệ chuyển động robot almega 16 đã đáp ứng được yêu cầu điều khiển: đảm bảo sai số của các khớp quay nhanh chóng đạt tới không với thời gian quá độ nhỏ.

Từ khóa: Thuật toán điều khiển bền vững thích nghi, robot Almega 16.

Abstract: The article has mentioned to problems of building up a robust adaptive control algorithm for motion of the Robot Almega 16 in joint space. Purpose of the controller is to combine both robust and adaptive algorithm to receiver their main advantages and limited the disadvantages. The proposed controller do not require to determiner exactly dynamic parameters of systems resolved estimated parameters, amount of calculation can be minized and ensure stability under effect of external noises. Results are simulated and experimented show that the robot Almega16 motion has meet controlled requirements: Steady – state error of joint angle conveges to zero very fast with transient time is small.

Keywords: Robust adaptive control algorithm, Robot Almega 16.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bài báo [2], [4], [3] việc xây dựng thuật toán điều khiển thích nghi Li - Slotine cho robot Almega 16 cho thấy ưu điểm của phương pháp này là khi không biết chính xác các thông số động lực học của robot Almega 16, luật điều khiển thích nghi theo Li - Slotine đã giải quyết vấn đề này bằng việc ước lượng các thông số đó, làm khối lượng tính toán giảm nhiều so với các phương pháp điều khiển khác [1], [5] mà vẫn đảm bảo robot

Almega 16 vận hành linh hoạt, đồng thời khử được các thành phần sai lệch góc khớp và vị trí của khâu tác động cuối làm cho hệ chuyển động robot Almega 16 ổn định, chính xác với thời gian quá độ nhỏ. Nhược điểm lớn nhất của phương pháp điều khiển này là yêu cầu khối lượng tính toán on-line lớn, và không bền vững khi có tác động nhiễu ngoại. Trong khi đó bộ điều khiển bền vững có ưu điểm là khối lượng tính toán on-line nhỏ nhất và sự ổn định bền vững của hệ khi có nhiễu ngoại.

Nhược điểm của phương pháp này là bộ điều khiển yêu cầu xác định trước các vùng bao của các tham số hệ thống và sự xuất hiện của nhiễu ngoại dẫn đến sẽ không thể đảm bảo sự bền vững tiệm cận của sai số bám quỹ đạo. Chính vì vậy khi kết hợp bộ điều khiển bền vững thích nghi sẽ có được các ưu điểm của bộ điều khiển thích nghi và bộ điều khiển bền vững hạn chế nhược điểm của chúng với tác động của nhiễu ngoại.

2. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI

Đối tượng nghiên cứu là robot Almega 16, [1], [2]. Phương trình động lực học được xây dựng, mô tả bởi:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_d \text{sign}(\dot{q}) + F_s(\dot{q}) + T_d \quad (1)$$

Trong đó:

M: ma trận quán tính; V: vectơ tương hỗ và ly tâm, G: vectơ trọng trường;

F_d: ma trận đường chéo xác định dương n×n, ma trận này dùng để mô tả ma sát động;

F_s: vectơ n×1 hằng số ma sát tĩnh;

T_d: vectơ n×1 mô tả nhiễu ngoại chưa biết.

Bộ điều khiển bền vững thích nghi sử dụng thuật toán tương tự như điều khiển bền vững, kết hợp bộ điều khiển phụ trợ để chặn các giá trị giới hạn của các tham số bất định [5], [6]. Giá trị giới hạn của các tham số bất định là các hàm vô hướng được tổ hợp bởi các chuẩn sai số và hằng số giới hạn dương.

Xét một hệ thống có mô hình động lực học mô tả sự bất định của bộ điều khiển bền vững cho bởi:

$$w = M(q)(\ddot{q}_d + \dot{e}) + V_m(q, \dot{q})(\dot{q} + \dot{e}) + G(q) + F_d\dot{q} + F_s(\dot{q}) + T_d \quad (2)$$

Để xác định giới hạn các thông số bất định

như khối lượng tải, hệ số ma sát, và nhiễu ngoại (2), có thể sử dụng hàm tỷ lệ dương ρ , được xác định:

$$\rho \geq \|w\|. \quad (3)$$

Như đã chỉ ra trong [Dawson et al.1990], những đặc tính vật lý của cánh tay robot có thể sử dụng phương trình (2) có thể giới hạn như sau:

$$\rho = \delta_0 + \delta_1 \|e\| + \delta_2 \|e\|^2 \geq \|w\| \quad (4)$$

Trong đó:

$$e = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} : \text{sai số của các khớp quay} \quad (5)$$

δ_0, δ_1 và δ_2 : các hằng số giới hạn dương.

Trong bộ điều khiển bền vững, yêu cầu vùng bao của các hằng số giới hạn dương được xác định trước và tính toán trên cơ sở giá trị lớn nhất của khối lượng tải, khối lượng thanh nối, hệ số ma sát, nhiễu ngoại,... Bộ điều khiển bền vững thích nghi phát triển ở đây sẽ "học" những hằng số giới hạn on-line khi cánh tay robot chuyển động. Đó là, trong lúc tiến hành điều khiển, chúng ta không yêu cầu biết chính xác những hằng số giới hạn, hơn nữa, chúng ta chỉ yêu cầu tồn tại các hằng số giới hạn đảm bảo theo (4).

Bộ điều khiển bền vững thích nghi được đề xuất như sau:

$$\tau = K_v r + v_R \quad (6)$$

Trong đó:

K_v: ma trận đường chéo xác định dương n×n;

r: sai số bám quỹ đạo;

xác định bởi: $r = e + \dot{e}$;

v_R: vectơ n×1 điều khiển phụ trợ.

Bộ điều khiển phụ trợ v_R trong (6) được định nghĩa bởi:

$$v_R = \frac{r\hat{\rho}^2}{\hat{\rho}\|r\| + \varepsilon} \quad (7)$$

$$\text{Trong đó: } \dot{\varepsilon} = -k_\varepsilon \varepsilon; \quad \varepsilon(0) > 0 \quad (8)$$

k_ε : một thông số điều khiển tỷ lệ dương;

$\hat{\rho}$: một hàm tỷ lệ định nghĩa bởi:

$$\hat{\rho} = \hat{\delta}_0 + \hat{\delta}_1 \|e\| + \hat{\delta}_2 \|e\|^2 \quad (9)$$

$\hat{\delta}_0, \hat{\delta}_1$ và $\hat{\delta}_2$: các ước lượng động học của thông số động học bị chặn δ_0, δ_1 và δ_2 .

Những ước lượng giới hạn đó được đánh dấu bởi “^” được cập nhật on-line dựa trên một luật thích nghi mới cập nhật.

Viết đơn giản (9):

$$\hat{\rho} = S\hat{\theta} \quad (10)$$

Trong đó:

$$S = [1 \|e\| \|e\|^2] \quad \text{và} \quad \hat{\theta} = [\hat{\delta}_0 \hat{\delta}_1 \hat{\delta}_2]^T$$

Từ đó viết rút gọn(4) nh sau:

$$\rho = S\theta \quad (11)$$

$$\text{Trong đó: } \theta = [\delta_0 \delta_1 \delta_2]^T$$

Có thể nhận thấy sự giống nhau giữa công thức của ma trận hồi qui trong phương pháp điều khiển thích nghi và công thức cho bởi (10). Đặc biệt, ma trận S (1x3) cấu thành bởi “ma trận hồi quy” và vectơ $\hat{\theta}$ tạo ra một “vectơ ước lượng tham số”.

Những ước lượng giới hạn định nghĩa trong (10) được cập nhật on-line bởi quan hệ:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma S^T |r| \quad (12)$$

Trong đó:

γ : hằng số điều khiển tỷ lệ dương.

Phương trình (12) có thể viết lại thành:

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\gamma S^T |r| \quad (13)$$

Trong đó:

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta} \quad (14)$$

Bộ điều khiển phụ (6) trong robot bằng với (1), (2) cho sai số hệ thống:

$$M(q)\dot{r} = -V_m(q, \dot{q})r - K_v r + w - v_R \quad (15)$$

Dựa vào tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, chọn hàm xác định dương, tron:

$$V = \frac{1}{2} r^T M(q)r + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \gamma^{-1} \tilde{\theta} + k_\varepsilon^{-1} \varepsilon \quad (16)$$

Đạo hàm (16) theo thời gian:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q)r + r^T M(q)\dot{r} + \tilde{\theta}^T \gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + k_\varepsilon^{-1} \dot{\varepsilon} \quad (17)$$

Thay (13) và (15) vào (17) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -r^T K_v r - S\tilde{\theta}\|r\| + r^T (w - v_R) + k_\varepsilon^{-1} \dot{\varepsilon} \\ & + \frac{1}{2} r^T (\dot{M}(q) + 2V_m(q, \dot{q}))r \end{aligned} \quad (18)$$

Do $M+2V_m$ là ma trận nghiêm ngặt đối, dễ thấy dòng thứ hai của (18) bằng không. Từ (18), chúng ta có thể dùng (14) và (11) để thay vào giới hạn trên của \dot{V} theo biểu thức:

$$\dot{V} \leq -r^T K_v r - S\tilde{\theta}\|r\| + S\theta\|r\| - r^T v_R + k_\varepsilon^{-1} \dot{\varepsilon} \quad (19)$$

Thay (7), (8), (10), (14) vào (19) ta có:

$$\dot{V} \leq -r^T K_v r - \varepsilon + S\hat{\theta}\|r\| - \frac{r^T r (S\hat{\theta})^2}{S\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon} \quad (20)$$

Có thể viết lại:

$$\dot{V} \leq -r^T K_v r - \varepsilon + S\hat{\theta}\|r\| - \frac{\|r\|^2 (S\hat{\theta})^2}{S\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon} \quad (21)$$

Hoặc:

$$\dot{V} \leq -r^T K_v r - \varepsilon + \frac{\varepsilon S\hat{\theta}\|r\|}{S\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon} \quad (22)$$

Do tổng của 2 số hạng cuối của (22) luôn luôn nhỏ hơn 0, chúng ta có thể thiết lập giới hạn trên mới của \dot{V} :

$$\dot{V} \leq -r^T K_v r \quad (23)$$

Từ kết quả trên chúng minh cho thấy sai lệch vị trí e là trạng thái ổn định tiệm cận.

Tổng quát thuật toán thiết kế bộ điều khiển bền vững thích nghi như sau:

$$\tau = K_v r + \frac{r \hat{\rho}^2}{\hat{\rho} \|r\| + \varepsilon} \quad (24)$$

Trong đó:

$K_v r$: thành phần đảm bảo bền vững

$\frac{r \hat{\rho}^2}{\hat{\rho} \|r\| + \varepsilon}$: thành phần thích nghi. Với giá trị

ước lượng $\hat{\rho}$ được thiết kế như sau (10):

$$\hat{\rho} = S \hat{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \left\| \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \right\| & \left\| \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \right\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_0 \\ \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \end{bmatrix}^T$$

$$r = e + \dot{e}, \text{ và } \dot{\varepsilon} = -k_\varepsilon \varepsilon$$

Luật cập nhật ước lượng giới hạn cho các tham số $\theta = [\delta_0 \delta_1 \delta_2]^T$:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma S^T \|r\|$$

Sai số vị trí e ở trạng thái ổn định tiệm cận.

Ước lượng giới hạn $\hat{\theta}$ và sai số bám vận tốc

được giới hạn.

3. MÔ PHÒNG BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI CHO 3 KHỚP ĐẦU ROBOT ALMEGA 16

Mô hình động học của robot Almega 16 xác định bởi:

$$2\dot{q}_1 + 0.5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) + 0.2 \sin(3t) \quad (25)$$

$$2\dot{q}_2 + 0.5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) + 0.2 \sin(3t) \quad (26)$$

$$2\dot{q}_3 + 0.5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_3) + 0.2 \sin(3t) \quad (27)$$

Bộ điều khiển momen τ_1, τ_2, τ_3 bền vững thích nghi (6):

$$\tau_1 = -K_v r_1 + r_1 \hat{\rho}^2 \frac{1}{\hat{\rho} \|r\| + \varepsilon} \quad (28a)$$

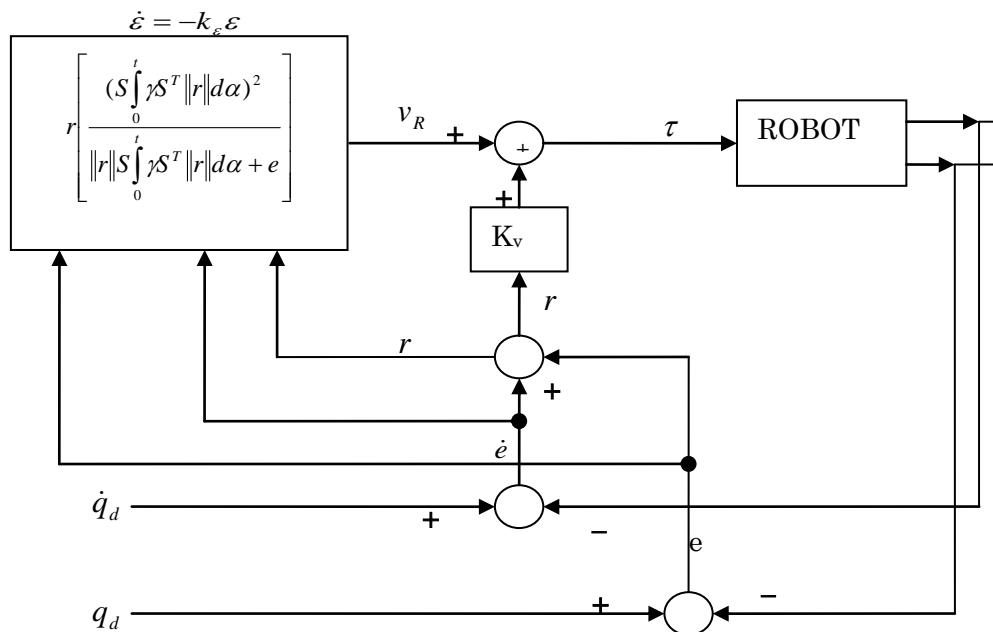
$$\tau_2 = -K_v r_2 + r_2 \hat{\rho}^2 \frac{1}{\hat{\rho} \|r\| + \varepsilon} \quad (28b)$$

$$\tau_3 = -K_v r_3 + r_3 \hat{\rho}^2 \frac{1}{\hat{\rho} \|r\| + \varepsilon} \quad (28c)$$

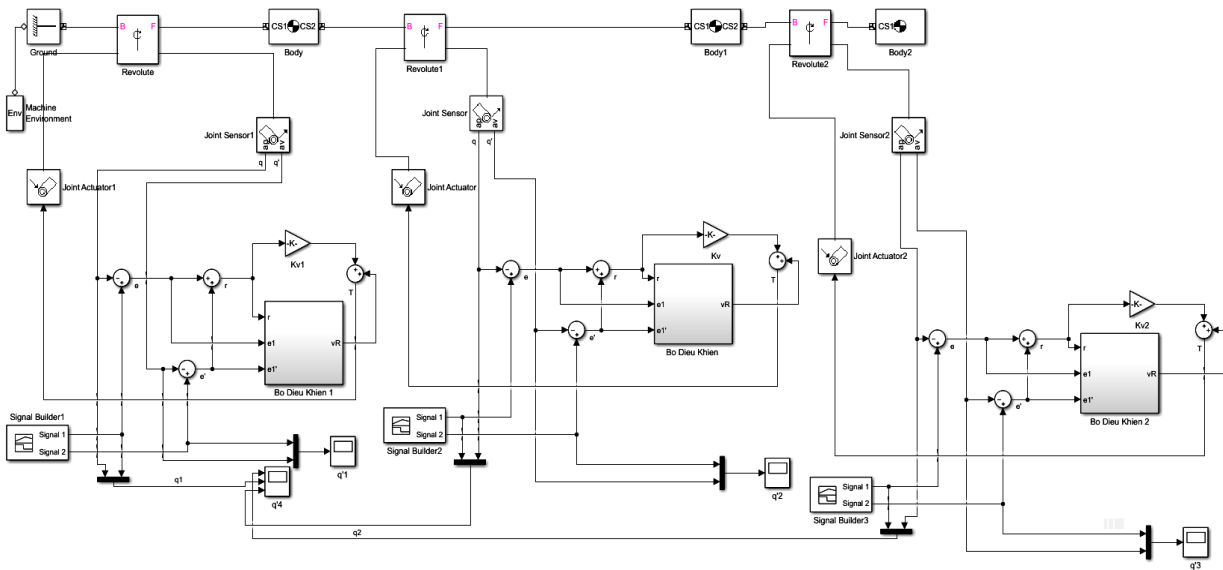
Trong đó:

$$K_v = k_v I; \quad r = e + \dot{e}; \quad \dot{\varepsilon} = k_\varepsilon \varepsilon;$$

$$\|r\| = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}$$



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển bền vững thích nghi



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển bền vững thích nghi mô phỏng trên Matlab/Simmechanic

Hàm giới hạn $\hat{\rho}$ được cho bởi:

$$\hat{\rho} = S\hat{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \|e\| & \|e\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_0 & \hat{\delta}_1 & \hat{\delta}_2 \end{bmatrix}^T$$

Trong đó:

$$\|e\| = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dot{e}_1^2 + \dot{e}_2^2 + \dot{e}_3^2}$$

Ước lượng giới hạn thông thường được cập nhật bởi:

$$\dot{\hat{\delta}}_0 = \gamma \|r\|, \quad \dot{\hat{\delta}}_1 = \gamma \|e\| \|r\|, \quad \dot{\hat{\delta}}_2 = \gamma \|e\|^2 \|r\|,$$

Bộ điều khiển bền vững thích nghi được mô phỏng cùng các tham số điều khiển, các điều kiện đầu, và các hằng số cho trước được chọn:

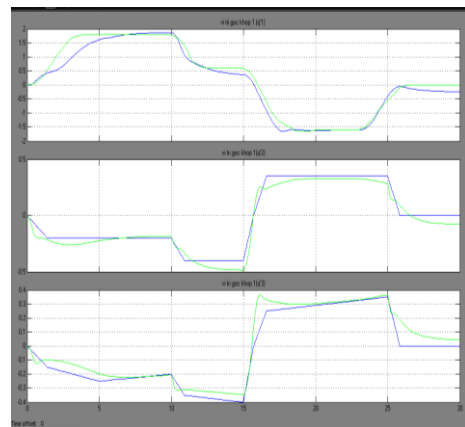
$$k_v = 50, \quad \gamma = 5, \quad \varepsilon(0) = 1, \quad k_\varepsilon = 1, \quad \hat{\delta}_0(0) = 20,$$

$$q_1(0) = q_2(0) = q_3(0) = \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = \dot{q}_3(0) = 0$$

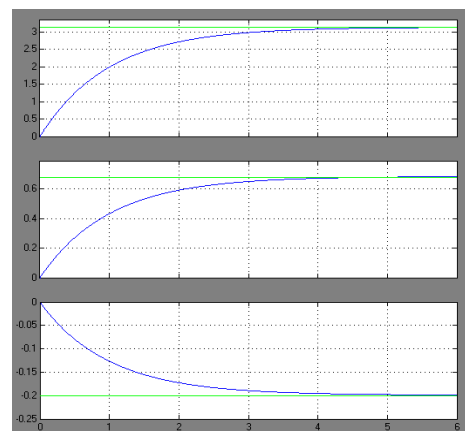
$$\hat{\delta}_1(0) = \hat{\delta}_2(0) = 0$$

Sơ đồ biểu diễn hệ thống điều khiển thích nghi bền vững (hình 1), tính toán tham số và khảo sát hệ thống bằng phần mềm Matlab/Simmechanic mô phỏng hệ thống (hình 2).

Kết quả mô phỏng:



Hình 3. Vị trí góc đo được trên cảm biến đặt tại các khớp, robot chuyển động theo quỹ đạo thiết kế trước



Hình 4. Vị trí góc đo được trên cảm biến đặt tại các khớp, robot chuyển động điểm - điểm

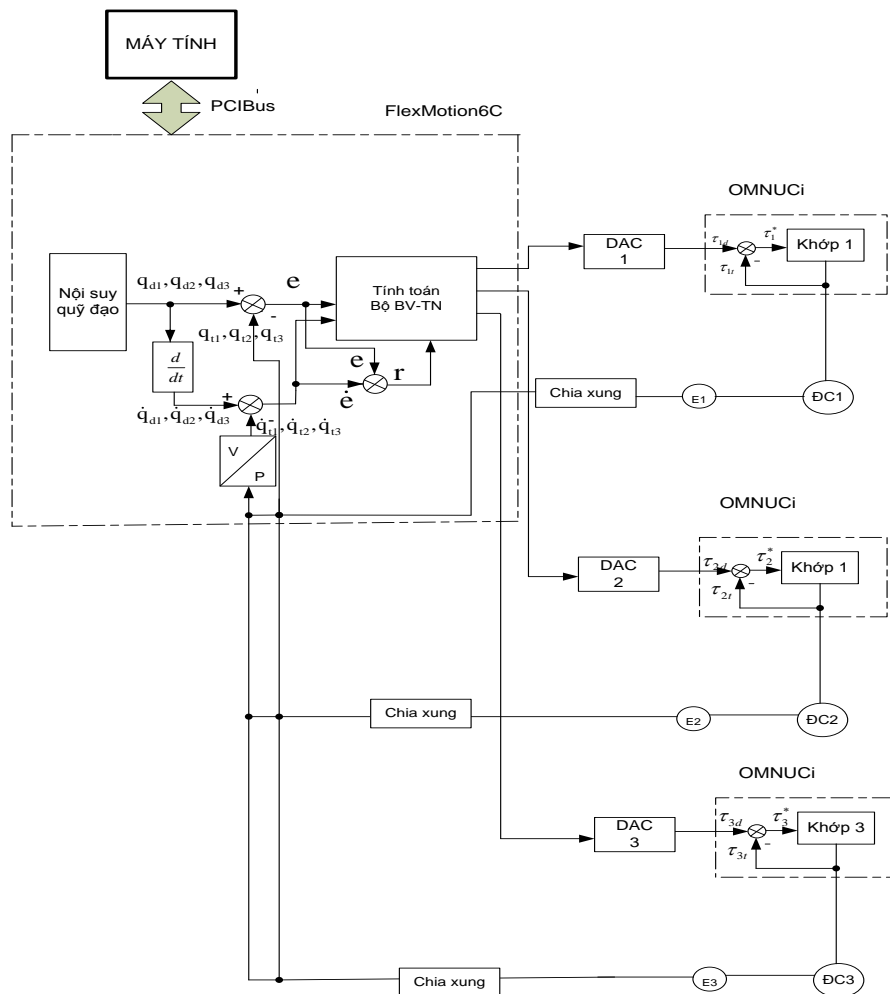
Nhận xét:

Các kết quả mô phỏng cho thấy các khớp chuyển động tương đối độc lập, rất ít bị ảnh hưởng bởi chuyển động của nhau. Vị trí góc của 3 khớp robot Almega 16 đều bám chính xác với quỹ đạo thiết kế và chuyển động điểm - điểm, đã đảm bảo sai số giữa các góc khớp đặt (q_d) và góc khớp thực (q_{thuc}) nhanh chóng đạt tới không với thời gian quá độ nhỏ.

4. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI CHO 3 KHỚP ĐẦU ROBOT ALMEGA 16

Xây dựng mô hình thực nghiệm ứng dụng bộ điều khiển bền vững thích nghi cho hệ chuyển động TMCN nhiều bậc tự do, với yêu cầu là điều khiển bám quỹ đạo chuyển động trong

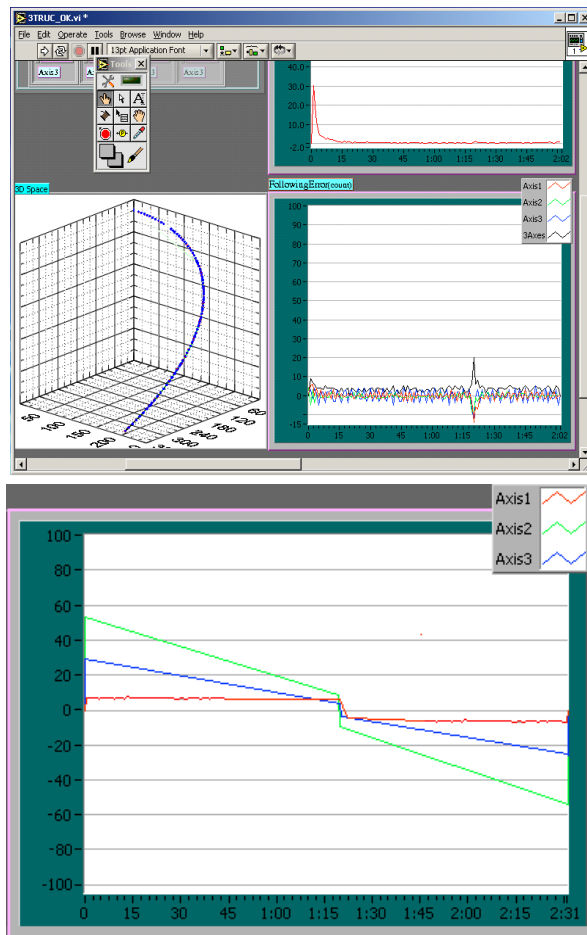
không gian ba chiều X, Y, Z (3D) với 3 khớp đầu của robot Almega 16. Mục tiêu của phần thực nghiệm được đặt ra: Đảm bảo được sai số điều khiển quỹ đạo nhỏ để đánh giá được chất lượng điều chỉnh bám chính xác của hệ chuyển động TMCN. Từ các kết quả thực nghiệm đạt được sẽ lấy làm cơ sở để khẳng định các kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng ở trên là đúng. Từ các kết quả thực nghiệm đạt được có thể minh chứng và làm cơ sở cho việc ứng dụng điều khiển các hệ động lực học phi tuyến khác có các thông số không xác định được hoặc không biết chính xác cho hệ chuyển động linh hoạt trong thực tế. Sơ đồ cấu trúc xác định bộ điều khiển bền vững thích nghi cho 3 khớp biểu diễn trên hình 5.



Hình 5. Cấu trúc xác định bộ điều khiển bền vững thích nghi cho 3 khớp robot

Kết quả thực nghiệm:

Các thông số trong sơ đồ cấu trúc xác định bộ điều khiển bền vững thích nghi cho 3 khớp đã được tính toán và cho kết quả thực hiện chạy chương trình ta thu được kết quả biểu diễn trên hình 6.



Hình 6. Đáp ứng vị trí và sai lệch vị trí cho 3 khớp robot Omega 16

Nhận xét: Đường quỹ đạo đặt và đường quỹ đạo đáp ứng của bàn kẹp robot Omega 16 có sai lệch rất nhỏ ($0.2 \cdot 10^{-3}$). Thời gian quá độ lớn của hệ thống là nhỏ ($t_{qd}=452$ ms). Giá trị trung bình sai lệch vị trí của cả 3 khớp khi sử dụng bộ điều khiển bền vững thích nghi cho 3 khớp là rất nhỏ (0,01 %). Thông qua đồ thị sai lệch vị trí của từng khớp (khớp 1, khớp 2, khớp 3) ta thấy hệ chỉ bị dao động nhỏ khi đã ở trạng thái ổn định.

5. KẾT LUẬN

Bộ điều khiển bền vững thích nghi đã kết hợp được ưu điểm và hạn chế những nhược điểm của điều khiển bền vững và điều khiển thích nghi. Việc giảm đáng kể khối lượng tính toán online của phương pháp điều khiển thích nghi, giúp hệ thống nhanh chóng ổn định đảm bảo tính thời gian thực trong xử lý điều khiển là rất quan trọng với các hệ thống công nghiệp nói chung và là yếu tố quyết định đối với khả năng đáp ứng các yêu cầu công nghệ của robot thế hệ mới nói riêng. Bộ điều khiển bền vững thích nghi vẫn luôn đảm bảo sự hoạt động ổn định của cánh tay robot trong một giới hạn của các nhiễu này. Việc tính toán chính xác các vùng bao, giới hạn trong điều khiển bền vững cũng gặp nhiều khó khăn, đôi khi không thể thực hiện được, điều khiển bền vững thích nghi là một giải pháp tốt và khả thi. Việc này có ý nghĩa rất quan trọng khi nghiên cứu điều khiển bền vững thích nghi cho các Robot có số bậc tự do lớn.

Đồng thời bài báo đề cập đến vấn đề chứng minh lại thuật toán điều khiển bền vững thích nghi bằng mô hình thực nghiệm (hình 5), điều này khẳng định lý thuyết xây dựng thuật toán điều khiển bền vững thích nghi là đúng đắn, độ bám quỹ đạo đã được cải thiện đảm bảo sự ổn định của hệ thống và phương pháp điều khiển bền vững thích nghi có tính khả thi trong thực tế. Bộ điều khiển bền vững thích nghi được cài đặt trong Card điều khiển chuyển động FlexMotion-6C kết hợp với hệ truyền động biến tần - động cơ của hãng Omron. Đo thực nghiệm với quỹ đạo 3D (X, Y, Z) hệ chuyển động robot Omega 16 chạy ổn định cho kết quả bám chính xác quỹ đạo đặt. Ngoài ra với thuật toán điều khiển bền vững thích nghi có nhược điểm là khối lượng tính toán lớn và cần phải biết một số thông cơ bản,

ngày nay với các bộ vi xử lý kỹ thuật tốc cao ứng dụng thuật toán điều khiển bền vững đều đáp ứng được theo yêu cầu. Qua kết quả thích nghi phù hợp cho hệ chuyển động robot mô phỏng và thực nghiệm cho thấy giải pháp công nghiệp nhiều bậc tự do.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Phạm Thực Anh, Võ Thu Hà, “*Xây dựng thuật toán điều khiển chuyển động Robot IRB 2400*”, tuyển tập các bài báo khoa học, hội nghị khoa học lần thứ 20, trang 226, năm (2006).
- [2] Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Phạm Thực Anh, Võ Thu Hà, “*Xây dựng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine cho Robot IRB 2400*”, tạp chí khoa học công nghệ các trường đại học kỹ thuật, số 69, năm (2009)
- [3] Ha.V.Th., “*Một số giải pháp điều khiển nhằm nâng cao chất lượng chuyển động của tay máy công nghiệp*”, luận án tiến sỹ, (2012).
- [4] Thái Hữu Nguyên, Phan Xuân Minh, Nguyễn Công Khoa, “*Điều khiển trượt rron thích nghi bền vững cho robot 3 bậc tự do*”, tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 52, (2014).
- [5] Neil Munro, Frank L.Lewis; “*Robot Manipulator Control Theory and Practice*”, Marcel Dekker, (2004).
- [6] Lorenzo Sciavico, Bruno Siciliano, “*Modeling and control of Robot Manipulator, McGraw-Hill Company*”, (1993).

Thông tin liên hệ: **Võ Thu Hà**

Điện thoại: 0913024989 - Email: vtha@uneti.edu.vn.

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