

LUẬT ĐIỀU KHIỂN TRÊN CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP BACKSTEPPING CHO ROBOT ALMEGA 16 TRONG KHÔNG GIAN KHỚP VÀ TRONG KHÔNG GIAN LÀM VIỆC

CONTROLLER BASIS ON BACKSTEPPING FOR ALMEGA 16 ROBOT IN JOINT SPACE AND IN WORKSPACE

Võ Thu Hà^{1,*}

TÓM TẮT

Trong ứng dụng thực tế của các thuật toán điều khiển dựa trên mô hình vào các hệ thống phi tuyến thường đòi hỏi các tham số động lực học phải được biết chính xác (khối lượng, chiều dài các khớp...). Tuy nhiên các Robot là hệ thống phi tuyến, xen kênh và bất định trong mô hình động lực học, do vậy cần có phương pháp điều khiển tiên tiến hơn để nâng cao độ bền vững trong bám quỹ đạo chính xác. Thuật toán cuốn chiếu có tính hệ thống cao trong thiết kế các bộ điều khiển đảm bảo ổn định tiệm cận cho các hệ thống phi tuyến bất định. Bài báo trình bày thuật toán điều khiển cuốn chiếu cho chuyển động bám quỹ đạo cho Robot n bậc tự do trong không gian khớp và không gian làm việc. Kết quả mô phỏng chuyển động bám quỹ đạo của Robot 3 bậc tự do khẳng định tính hiệu quả của luật điều khiển đề xuất: hệ chuyển động Robot đảm bảo sai số của các khớp quay, vị trí cơ cấu tác cuối nhanh chóng đạt tới không với thời gian quá độ nhỏ, làm cho hệ thống kín ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

Từ khóa: Robot, phương pháp cuốn chiếu, hàm Lyapunov.

ABSTRACT

The Practical implementation of the conventional model-based controllers for nonlinear systems requires that the parameters in the dynamic models be known precisely (mass, joint length v.v.). It is well known that robot manipulators are considered as a class of nonlinear systems with large coupling and uncertainties in dynamic models, thus advanced approaches should be developed to improve robustness in high-accuracy tracking motions. The backstepping control is a systematic technique for designing globally stable and asymptotically controllers for nonlinear systems. The paper presents the backstepping control law for the tracking motion of nDOF Robot manipulators in joint space and in workspace. Simulation results of tracking motions of 3DOF Robot have reconfirmed the effectiveness of the proposed control law: Robot movement system ensures that the errors of the rotating joints quickly reach zero with a small transition time, making the closed system stable according to Lyapunov standards.

Từ khóa: Robot, Backstepping, Lyapunov standards.

¹Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: vtha@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/4/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 12/5/2022

Ngày chấp nhận đăng: 27/6/2022

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thực tế, để Robot công nghiệp (RBCN) bám theo một quỹ đạo đặt trước trong không gian làm việc [2, 3] thì

RBCN phải đi theo một quỹ đạo định trước trong không gian khớp. Sự biến đổi từ không gian làm việc sang không gian khớp được thực hiện bằng kỹ thuật “dạy và lặp lại” (teach and play back) thay cho việc sử dụng khâu biến đổi động học ngược có thể bao gồm mô hình không xác định. Kỹ thuật này làm việc tốt nếu phép biến đổi có thể lặp lại. Do vậy sẽ không ngạc nhiên nếu một bộ điều khiển không gian khớp có thể thực hiện bám theo quỹ đạo thiết kế trong không gian làm việc mà không cần phản hồi từ vị trí khâu tác động cuối, từ đó RBCN được kết cấu chất lượng cao với khả năng lặp lại chính xác và giải quyết để loại bỏ tính không xác định.

Trong điều khiển không gian khớp, phản hồi từ không gian khớp được đưa về để điều khiển hệ thống bám theo quỹ đạo thiết kế. Hệ thống điều khiển này không phát hiện ra sai lệch vị trí của khâu tác động cuối trong không gian làm việc. Hơn nữa, việc thu được tín hiệu phản hồi từ không gian làm việc không dễ dàng như ở không gian khớp: vị trí của khớp được đo phù hợp bằng thiết bị encoder; vị trí khâu tác động cuối có thể được phát hiện khi sử dụng hệ thống quan sát.

Có một thách thức trong điều khiển robot là loại bỏ tính bất định, phi tuyến và sự nổi từ nhiều hướng khác nhau trong không gian của điều khiển bền vững [1]. Điều khiển bền vững cung cấp sự ổn định trong tính bất định với sự đánh đổi giữa thực hiện bám và biên giới của sự bất định. Phương pháp điều khiển này tiếp cận bao quát để điều khiển RBCN trong không gian khớp trong khi điều khiển trong không gian làm việc vẫn là vấn đề phức tạp.

Trong điều khiển không gian làm việc, bộ điều khiển xấp xỉ Jacoby có bù trọng trường [3] sử dụng nhiều trong thí nghiệm khi các thông số động học, động lực học là phải biết chính xác. Với việc lựa chọn thích hợp bộ thông số của bộ điều khiển thì kết quả sai lệch tính là tiến về không sau khoảng thời gian ngắn khoảng 1 giây, không có dao động, không có độ quá điều chỉnh. Tuy nhiên nếu các thông số động lực học đưa vào bộ điều khiển mà có sai khác với thông số thực thì kết quả này không còn đảm bảo nữa, sai lệch e là không tiến về không, thậm chí là có dao động và có độ quá điều chỉnh dẫn tới bộ điều khiển này không được sử dụng trong thực tế đặc biệt là các điều khiển trong

chuyển động chất lượng cao. Còn phương pháp điều khiển Setpoint Jacobian xấp xỉ có bù thích nghi lực trọng trường [3] thì với việc cập nhật online các thông số động lực học trong thành phần trọng trường. Kết quả là sai lệch tĩnh đã tiến về 0 và không có độ quá điều chỉnh. Tuy nhiên phương pháp này mới chỉ dừng lại ở việc cập nhật thích nghi các thông số động lực học còn các thông số động học thì chưa cập nhật, nếu như xét đến sai lệch của các thông số động học này thì kết quả đầu ra vẫn tồn tại sai lệch tĩnh. Điều này sẽ được khắc phục ở phương pháp điều khiển bám thích nghi ma trận Jacobian [3] được đề nghị cho điều khiển bám quỹ đạo của tay máy trong không gian làm việc khi các tham số không xác định. Bộ điều khiển không yêu cầu chính xác về ma trận Jacoby và thông số động học. Hơn nữa, một phương pháp điều khiển bám thích nghi trong không gian làm việc được đề xuất sử dụng quan sát thông tin không gian làm việc để loại bỏ việc không xác định của các tham số trong mô hình gồm cả thiết bị chấp hành. Như vậy điều khiển thích nghi robot trong không gian làm việc sẽ thành công trong việc loại bỏ sự bất định của các thông số, tuy nhiên tính không có cấu trúc là một vấn đề cần tiếp tục xem xét. Hiện nay có nhiều phương pháp thiết kế phi tuyến như phương pháp tuyến tính hóa chính xác, phương pháp tựa phẳng, điều khiển mờ, mạng nơron, phương pháp Backstepping... Trong nội dung bài báo này ứng dụng phương pháp thiết kế phi tuyến dựa trên cơ sở hàm Lyapunov thiết lập theo phương pháp Backstepping cho Robot Almega16 điều khiển trong không gian khớp và không gian làm việc.

2. PHÂN TÍCH CÁC THAM SỐ TRONG PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC [1, 2]

Phương trình động lực học của robot n bậc tự do:

$$\tau = M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_d \dot{q} + F_s + \tau_d \quad (1)$$

Trong đó:

q: vectơ nx1 các biến khớp, $q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]^T$

q̇(t): vectơ nx1 tốc độ thay đổi các biến khớp (vận tốc góc, vận tốc thẳng). $\dot{q}(t) = [\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t)]^T$,

q̈(t): vectơ nx1 gia tốc biến khớp;

q̈(t) = [q̈₁(t), q̈₂(t), ..., q̈_n(t)]^T,

M(q): ma trận quán tính (nxn) trong hệ tọa độ khớp có các thành phần (i,j).

H(q, q̇): vectơ tương hỗ và ly tâm (nx1),

H(q, q̇) = [h₁, h₂, ..., h_n]^T

G(q): vectơ trọng trường (nx1).

G = [G₁, G₂, ..., G_n]^T

F_d: vectơ lực ma sát động; **F_s**: vectơ nx1 hằng số ma sát nhớt; **τ_d**: vectơ nx1 mô tả nhiễu ngoại chưa biết

Thay: **H(q, q̇) = C(q, q̇)q̇ + G(q) + F_d(q̇) + F_s + τ_d**

Ta được: **T = M(q)q̈ + H(q, q̇)** (2)

Trong phương trình (2) chứa các thành phần không xác định như: lực ma sát, tải thay đổi, nhiễu, mô hình động lực học. Nên ta tách ra thành các thành phần xác định (known) và không xác định (unknown)

$$\begin{aligned} M(q) &= M_k(q) + M_u(q) \\ H(q, \dot{q}) &= H_k(q, \dot{q}) + H_u(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} H(q, \dot{q}) &= V_k(q, \dot{q}) + G_k(q) + F_{dk} \dot{q} \\ H_u(q, \dot{q}) &= V_u(q, \dot{q}) + G_u(q) + F_{du} \dot{q} + F_s + T_d \end{aligned} \quad (4)$$

Thiết kế bộ điều khiển cần phải có giả thiết sau:

$$\begin{aligned} M(q) &\leq m \cdot I_n, \forall q \in R^n \\ \|V(q, \dot{q})\| &\leq \xi_v \cdot \|\dot{q}\|, \forall q, \dot{q} \in R^n \\ \|F_d(\dot{q}) + F_s\| &\leq \xi_{fd} \cdot \|\dot{q}\| + \xi_{fs}, \forall q, \dot{q} \in R^n \\ \|G(q)\| &\leq \xi_g, \forall q \in R^n \\ \|T_d\| &\leq \xi_t \end{aligned}$$

Với: ξ_{fd}, ξ_{fs}, ξ_g, ξ_v, ξ_t là các hằng số dương đã biết trước.

Ta có được các giả thiết này là do: Ma trận **M(q)** là đối xứng xác định dương, các thành phần đều có biên độ giới hạn vì chỉ chứa các hàm sin, cos của biến khớp. Thành phần lực Coriolis và momen nhớt **V(q, q̇)**, momen trọng trường **G(q)** cũng là những đại lượng bị chặn. Đồng thời thành phần masat, nhiễu cũng phải có giá trị hữu hạn cho phép tùy thuộc kết cấu cơ khí của robot.

3. LUẬT ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING TRONG KHÔNG GIAN KHỚP CHO ROBOT ALMEGA 16 [4-8]

Thay hệ phương trình (3) vào (2), luật điều khiển:

$$T = [M(q) + M_u(q)] \cdot \ddot{q} + H_k(q, \dot{q}) + H_u(q, \dot{q}) \quad (5)$$

Đặt sai lệch vị trí và sai lệch vận tốc trong không gian khớp là: **e = q_d - q** - sai số vị trí của khớp tay máy; **ė = q̇_d - q̇** - sai số vận tốc của khớp tay máy.

Theo phương trình (5) ta đề xuất đưa ra luật điều khiển có dạng sau:

$$T = M_k(q) \cdot \ddot{q}_d + H_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u \quad (6)$$

Trong đó:

q_d ∈ Rⁿ : gia tốc đặt trước; α, k: các hằng số dương;

u: luật điều khiển bền vững mới.

Thay (6) vào (5) và rút gọn:

$$\ddot{e} = M_k^{-1}(q) \cdot [M_u(q, \dot{q}) + H_u(q, \dot{q}) + \alpha \cdot e + k \cdot \dot{e} - u] \quad (7)$$

Đặt:

$$\Delta A = M_u(q) \ddot{q}_d + H_u(q, \dot{q}) + \alpha \cdot e + k \cdot \dot{e} \quad (8)$$

Coi tất cả các khớp là quay và theo các giả thiết phía trên ta có:

$$\begin{aligned} \|\Delta A\| &\leq \|m(q)\| \cdot \|\ddot{q}_d\| + \xi_v(q) \cdot \|\dot{q}_d\|^2 + \xi_{fd} \cdot \|\dot{q}\| \\ &\quad + \xi_{fs} + \xi_g(q) + \xi_t + \alpha \cdot \|e\| + k \cdot \|\dot{e}\| \end{aligned} \quad (9)$$

Ta chuyển (9) sang dạng sau:

$$\|\Delta A\| \leq \beta + \alpha \cdot \|e\| + k \cdot \|\dot{e}\| \quad (10)$$

β là hằng số.

Đặt: $e = x_1; \dot{e} = x_2$ phương trình (6) trở thành hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M_k^{-1}(q) \cdot (\Delta A - u) \end{cases} \quad (11)$$

Hệ kín (11) có thể điều khiển bằng phương pháp backstepping, do đó ta chọn x_2 là luật điều khiển cho đến x_1 khi hội tụ về 0. Do đó ta đề xuất x_2 như sau:

$$x_2 = -\mu x_1 \quad (12)$$

Với μ là hằng số dương

Chứng minh tính ổn định (11). Ta chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V_1(x_1) = \frac{1}{2} \cdot x_1^T \cdot x_1 \quad (13)$$

Lấy đạo hàm (13) theo thời gian ta được:

$$\dot{V}_1(x_1) = \dot{x}_1^T \cdot x_1 \quad (14)$$

Thay (11) và (12) vào (14) ta được:

$$\dot{V}_1(x_1) = -\mu \cdot x_1^T \cdot x_1 \quad (15)$$

Theo (15) ta thấy rằng $\dot{V}_1(x_1) \leq 0$ do đó x_1 luôn luôn hội tụ về không.

Kết quả mô phỏng được nêu trong phần 5.

*** Luật điều khiển trong không gian khớp:**

Luật điều khiển backstepping được hình thành trên cơ sở chứng minh tính ổn định của hệ thống vòng kín (11). Ta chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \cdot x_1^T \cdot x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1)^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \quad (16)$$

Đạo hàm (16) theo thời gian được:

$$\dot{V}(x_1, x_2) = \dot{x}_1^T \cdot x_1 + (\dot{x}_2 + \mu \cdot \dot{x}_1)^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \quad (17)$$

Thay (11) (12) vào (17) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1, x_2) = & -\mu \|x_1^T\| \cdot x_1 \\ & + [M_k^{-1}(q) \cdot (\Delta A - u) + \mu \cdot x_2]^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \end{aligned} \quad (18)$$

Rút gọn (18):

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1, x_2) = & -\mu \cdot \|x_1\|^2 + [M_k^{-1}(q) \cdot (\Delta A)]^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \\ & + [\mu \cdot x_2 - M_k^{-1}(q) \cdot u]^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1). \end{aligned} \quad (19)$$

Theo các giả thiết ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1, x_2) \leq & -\mu \cdot \|x_1\|^2 + \|m^{-1}\| \cdot \|\Delta A\| \cdot \|x_2 + \mu \cdot x_1\| \\ & + [\mu \cdot x_2 - M_k^{-1}(q) \cdot u]^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \end{aligned} \quad (20)$$

Theo (20) luật điều khiển mới được viết như sau:

$$u = M_k(q) \cdot \mu \cdot x_2 + \gamma \cdot M_k(q) \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1) \quad (21)$$

Trong đó: γ là hằng số dương.

Thay (21) vào (20):

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1, x_2) \leq & -\mu \cdot \|x_1\|^2 + \|m^{-1}\| \cdot \|\Delta A\| \cdot \|x_2 + \mu \cdot x_1\| \\ & - \gamma \cdot \|x_2 + \mu \cdot x_1\|^2 \end{aligned} \quad (22)$$

Thay (10),(11),(12) vào (22):

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1, x_2) \leq & -\mu \cdot \|x_1\|^2 + \|m^{-1}\| \cdot \epsilon \|x_1\| \\ & + \|m^{-1}\| \cdot \lambda \cdot \|x_1\| - \gamma \cdot \|x_2 + \mu \cdot x_1\|^2 \end{aligned} \quad (23)$$

Ở đây: ϵ, λ là các hằng số dương.

Theo (21) và (23), μ, γ là các hệ số điều khiển.

Để đảm bảo $\dot{V}(x_1, x_2) \leq 0$ ta phải lựa chọn những hệ số trên cho phù hợp (để các thành phần mang dấu âm lớn hơn các thành phần dương).

Do vậy hệ thống vòng kín (11) ổn định toàn cục phụ thuộc vào các hệ số điều khiển, γ . Như vậy luật điều khiển μ, γ . Như vậy luật điều khiển trong không gian khớp là:

$$T = M_k(q) \ddot{q}_d + H_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u \quad (24)$$

Với: $u = M_k(q) \cdot \mu \cdot \dot{e} + \gamma \cdot M_k(q) \cdot (\dot{e} + \mu \cdot e)$

4. LUẬT ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING TRONG KHÔNG GIAN LÀM VIỆC CHO ROBOT ALMEGA 16 [4-8]

Hệ thống vòng kín (11) ổn định toàn cục khi sử dụng luật điều khiển trong không gian khớp (24) đã được chứng minh phần 3, để đảm bảo bám theo quỹ đạo một cách chính xác trong không gian làm việc mà sử dụng luật (24) thì không thực hiện được. Phải chuyển luật điều khiển robot backstepping từ không gian khớp sang không gian làm việc.

Phương trình động lực trong không gian khớp được biểu diễn như sau:

$$F = A(q)\ddot{x} + N(q, \dot{q}) \quad (25)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} A(q) &= J^{-T}(q) \cdot M(q) \cdot J^{-1}(q) \\ N(q, \dot{q}) &= J^{-T}(q) \cdot H(q, \dot{q}) - J^{-T}(q) \cdot M(q) \cdot J^{-1}(q) \cdot j(q) \cdot \dot{q} \end{aligned} \quad (26)$$

Trong phương trình có chứa các thành phần không xác định nên ta tách (26) thành hai thành phần: Thành phần xác định (known), thành phần không xác định (unknown).

$$\begin{aligned} A(q) &= A_k(kq) + A_u(q) \\ A(q) &= J^{-T}(q) \cdot M(q) \cdot J^{-1}(q) \\ N(q, \dot{q}) &= J^{-T}(q) \cdot H(q, \dot{q}) - J^{-T}(q) \cdot M_k(q) \cdot J^{-1}(q) \cdot j(q) \cdot \dot{q} \end{aligned}$$

Chứng minh hệ thống (26) ổn định toàn cục, tương tự chứng minh trong không gian khớp ta có sử dụng hàm Lyapunov sau:

$$V_1(x_1) = \frac{1}{2} \cdot x_1^T \cdot x_1$$

$$V_1(x_1, x_2) = \frac{1}{2} \cdot x_1^T \cdot x_1 + \frac{1}{2} (x_2 + \mu \cdot x_1)^T \cdot (x_2 + \mu \cdot x_1)$$

Từ đó rút ra được luật điều khiển trong không gian làm việc như sau:

$$F = A_k(q)\ddot{x}_d + N_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u \tag{27}$$

Với:

$$u = A_k(q) \cdot \mu \cdot \dot{e} + \gamma \cdot A_k(q) \cdot (\dot{e} + \mu \cdot e)$$

$$e = x_d - x; \dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}$$

Trong đó:

α, k, μ, γ : các hằng số dương; \dot{x}_d : vecto vận tốc đặt trong không gian làm việc

e, \dot{e} : Là vecto sai lệch vị trí và vận tốc tương ứng trong không gian làm việc.

Thay đổi luật điều khiển trong không gian làm việc:

Một vấn đề quan trọng trong luật điều khiển backstepping là yêu cầu tính nhạy phải được xem xét ở đây. Luật điều khiển (27) được tạo ra bằng cách đo các giá trị: vị trí góc khớp q , vận tốc \dot{q} , vị trí điểm cuối x , vận tốc điểm cuối \dot{x} . Vị trí khớp thường được đo bằng encoder, vận tốc khớp có thể đo trực tiếp hoặc đạo hàm của q , được đo bằng hệ thống quan sát (vision). Tuy nhiên thường không đo lường mà có thể được tính toán. Luật điều khiển (27) được thay đổi như sau:

$$F = A_k(q)\ddot{x}_d + N_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u \tag{28}$$

$$u = A_k(q) \cdot \mu \cdot \dot{e} + \gamma \cdot A_k(q) \cdot (\dot{e} + \mu \cdot e)$$

$$e = x_d - x; \dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}$$

Với:

$$A_k(q) = \hat{J}^T(q) \cdot M_k(q) \cdot \hat{J}^{-1}(q)$$

$$N_k(q, \dot{q}) = \hat{J}^T(q) \cdot H_k(q) - \hat{J}^{-1}(q) M_k(q) \cdot \hat{J}^{-1}(q) \cdot \dot{J}(q) \cdot \dot{q}$$

$\hat{J}(q)$: là ma trận ước lượng Jacoby.

Luật điều khiển (28) lúc này chỉ cần đo các giá trị q, \dot{q} và vị trí điểm cuối x . Do đó luật (28) được dùng trong thực tế nhiều hơn so với luật (27). Nhưng do ma trận Jacoby là ước lượng nên trong luật (28) có sai lệch tính toán vận tốc. Do vậy hệ thống vòng kín ổn định trong một giới hạn bị chặn đều cho phép khi sử dụng luật điều khiển (28). Để giảm bớt việc tính toán trong luật điều khiển (28), ta có thể tính toán sai lệch vị trí thông qua tính toán sai lệch vận tốc. Như vậy luật điều khiển (28) lúc này sẽ là:

$$F = A_k(q)\ddot{x}_d + N_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u \tag{29}$$

$$Với: u = A_k(q) \cdot \mu \cdot \dot{e} + \gamma \cdot A_k(q) \cdot (\dot{e} + \mu \cdot e)$$

Trong đó:

$$\dot{e} = \int \dot{e} dt, \quad \dot{e} = \dot{x}_d - \dot{J}(q) \cdot \dot{q}$$

$$A_k(q) = \hat{J}^T(q) \cdot M_k(q) \cdot \hat{J}^{-1}(q)$$

$$N_k(q, \dot{q}) = \hat{J}^T(q) \cdot H_k(q) - \hat{J}^{-1}(q) M_k(q) \cdot \hat{J}^{-1}(q) \cdot \dot{J}(q) \cdot \dot{q}$$

Để áp dụng luật điều khiển (29) chúng ta cần đo vị trí góc q và vận tốc góc \dot{q} . Mặc dù hệ thống vòng kín ổn định giới hạn đều khi sử dụng luật điều khiển trên, nhưng sai lệch bám theo quỹ đạo trong không gian làm việc có thể kiểm soát được theo công thức sau:

$$\dot{e} = x_d - \dot{x}; \dot{e} = \dot{x}_d - \hat{J}(q) \cdot \dot{q}$$

$$\dot{e} = m \cdot e; \dot{e} = m \cdot \dot{e}$$

$$\dot{e} - e = m \cdot (\dot{e} - e) = \dot{x} - \hat{J}(q) \cdot \dot{q}; \dot{e} - e = m^{-1} \cdot (\dot{x} - \hat{J}(q) \cdot \dot{q})$$

Nhận xét: Luật điều khiển trong không gian làm việc không cần đo giá trị vận tốc. Để xác định sai lệch vận tốc chỉ cần tính toán thông qua ma trận Jacoby ước lượng và giá trị đặt; Sai lệch giữa vị trí thực và vị trí đặt trong không gian làm việc sẽ được giảm đi đáng kể khi tăng hệ số điều khiển.

Ưu điểm của phương pháp Backstepping: Đưa ra một quy trình mang tính hệ thống cao trong thiết kế bộ điều khiển đảm bảo ổn định bằng giải pháp tuần tự theo từng bước. Tránh được sự triệt tiêu tính phi tuyến hữu ích để đạt được ổn định trong bám quỹ đạo.

Nhược điểm phương pháp Backstepping: Khối lượng tính toán lớn.

Cơ sở lý thuyết phương pháp Backstepping [4]: Hàm CLF $V(x)$ được xem như là công cụ toàn năng để thiết kế bộ điều khiển ổn định cho đối tượng phi tuyến. Song chưa có phương pháp tổng quát để xác định hàm CLF nhanh chóng và đơn giản. Một tư tưởng thiết kế (hiện có lẽ là duy nhất) rất hữu ích trong việc xác định hàm CLF cho hệ gồm nhiều hệ con tạo thành là thiết kế cuốn chiếu (backstepping) hàm CLF. Tức là xác định hàm CLF cho toàn hệ từ những hàm CLF của các hệ con bên trong nó được giả thiết là đã biết bằng cách sử dụng một số biến trạng thái ảo và thiết kế các thuật toán điều khiển trung gian cho chúng.

5. ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING CHO ROBOT ALMEGA 16 3 BẬC TỰ DO

5.1. Thông số của Robot 3 bậc tự do

Robot 3 bậc tự do, khớp 1 và khớp 2 là khớp quay; khớp 3 là khớp tịnh tiến. Các thông số của Robot như trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số của robot

Kí hiệu	Giá trị	Ý nghĩa
m_1	4kg	Khối lượng thanh nối 1
m_2	2kg	Khối lượng thanh nối 2
m_3	2,5kg	Khối lượng thanh nối 3
l_1	0,25m	Chiều dài thanh nối 1
l_2	0,15m	Chiều dài thanh nối 2

5.2. Mô phỏng điều khiển chuyển động Robot 3 bậc tự do bằng phương pháp Backstepping không gian khớp

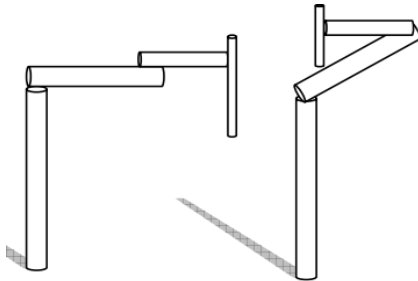
Luật điều khiển theo (24):

$$T = M_k(q)\ddot{q}_d + H_k(q, \dot{q}) - \alpha \cdot e - k \cdot \dot{e} + u$$

Với: $u = M_k(q) \cdot \ddot{e} + \gamma M_k(q) \cdot (\dot{e} + \mu e)$
 $H_s = H + F_d \cdot \dot{q} + F_s + T_d$

Giả sử điều khiển cho Robot chạy từ vị trí đầu $q_0 = [0 \ 0 \ 0,1]$ chuyển động theo quỹ đạo 2-1-2 tới vị trí

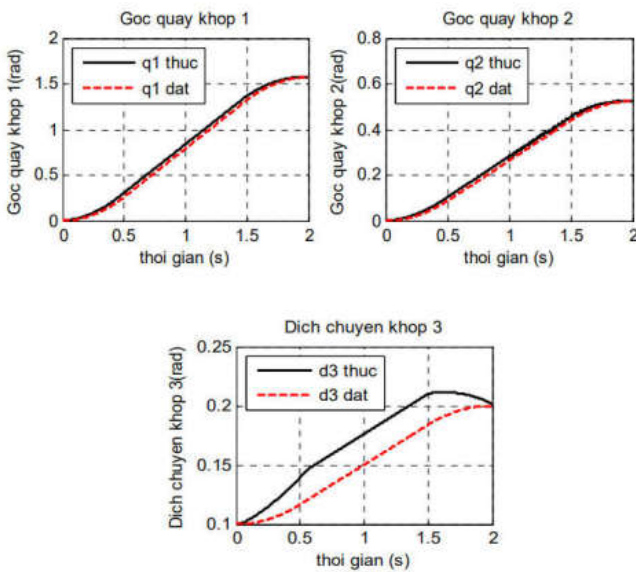
$$q_1 = \left[\frac{\pi}{6} \ \frac{\pi}{6} \ 0,2 \right]$$



Hình 1. Vị trí Robot ban đầu và vị trí cuối

Sau khi chỉnh các thông số μ, γ ta được một số kết quả sau:

$$k = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mu = \begin{bmatrix} 32 & 0 & 0 \\ 0 & 32 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; \gamma = \begin{bmatrix} 45 & 0 & 0 \\ 0 & 45 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

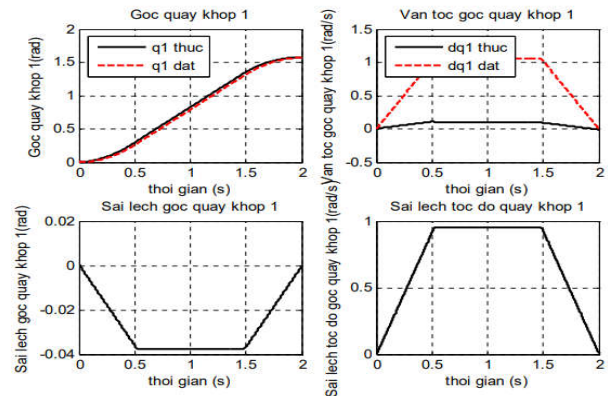


Hình 2. Kết quả khi μ, γ nhỏ

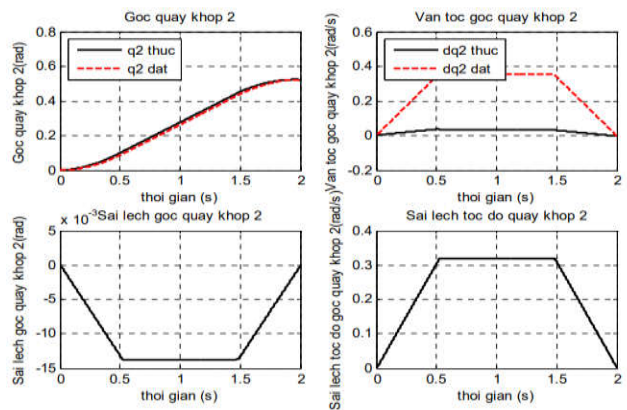
Ta thấy rằng khi μ, γ quá nhỏ thì chưa đủ để làm cho hàm CLF thỏa mãn $\dot{V} \leq 0$ nên các giá trị thực rất xa rời. Khi tăng dần μ, γ đến một ngưỡng nào đó $\mu \geq 30, \gamma \geq 48$ thì quỹ đạo thực bắt đầu bám quỹ đạo đặt, tuy nhiên chưa đủ lớn thì sẽ gây dao động.

Khi ta tăng các hệ số μ, γ đủ lớn, sai lệch giảm đi rất nhiều, quỹ đạo thực bám sát quỹ đạo đặt, cụ thể với các hệ số như sau:

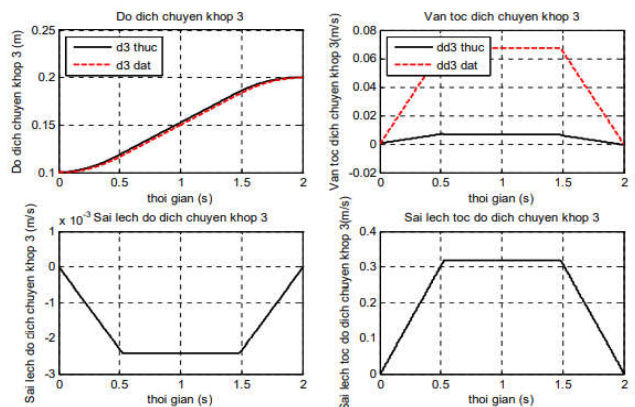
$$k = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mu = \begin{bmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; \gamma = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$



Hình 3. Đáp ứng góc quay 1 khi tăng μ, γ



Hình 4. Đáp ứng góc quay 2 khi tăng μ, γ



Hình 5. Đáp ứng vị khớp tịnh tiến 3 khi tăng μ, γ

Nhận xét: Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đáp ứng tốt, quỹ đạo thực bám sát quỹ đạo đặt.

Khi ta tăng các hệ số điều khiển μ, γ lên từ $\begin{bmatrix} 32 & 0 & 0 \\ 0 & 32 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$

đến $\begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$ thì sai lệch góc quay khớp 1, khớp 2, vị trí khớp 3 tiến đến không.

5.3. Mô phỏng điều khiển chuyển động Robot 3 bậc tự do bằng phương pháp Backstepping cho robot trong không gian làm việc

Luật điều khiển theo (28):

$$T = \hat{J}^T(q)[N_k(q, \dot{q}) - a.e - k.\dot{e} + u]$$

$$u = A_k(q).\mu.\dot{e} + \gamma.A_k(q).(e + \mu.e)$$

Với: $e = x_d - x; \dot{e} = \dot{x}_d - \hat{J}(q).\dot{q}$
 $A_k(q) = \hat{J}^{-T}(q).M_k(q)\hat{J}^{-1}(q)$

$$N_k(q, \dot{q}) = \hat{J}^{-T}(q).H_k(q) - \hat{J}^{-1}(q)M_k(q)\hat{J}^{-1}(q).\dot{q}$$

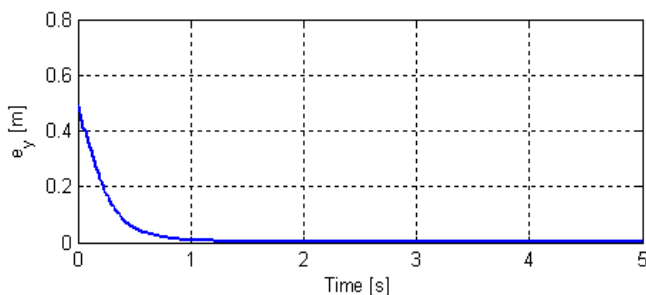
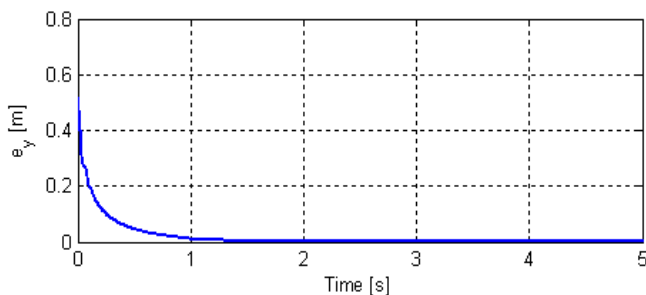
Giả sử ta điều khiển robot từ vị trí đầu $x_0 = [0 \ 0 \ 0]$ chuyển tới vị trí $x_d = 0,3[m]; y_d = 0,5[m]$.

Yêu cầu điều khiển: sai lệch vị trí $e = x - x_d \rightarrow 0$; sai lệch vận tốc $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d \rightarrow 0$

Trong đó: Thông số động học và động lực học ước của robot như sau: $\hat{m}_1 = 4,5; \hat{m}_2 = 2,5; \hat{m}_3 = 3,0; \hat{I}_1 = 0,26; \hat{I}_2 = 0,16$.

Các thông số điều khiển như sau:

$$k = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mu = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}; \gamma = \begin{bmatrix} 85 & 0 & 0 \\ 0 & 86 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$



Hình 6. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo trong không gian làm việc

6. KẾT LUẬN

Thuật toán điều khiển có sử dụng kỹ thuật cuốn chiếu (Backstepping) phù hợp trong điều khiển chuyển động bám quỹ đạo của robot khi các thông số động lực học không xác định trước. Sự ổn định của hệ thống động lực học kín được chứng minh theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Các tín hiệu điều khiển có dạng toán học tương đối đơn giản, do đó tăng tính khả thi khi áp dụng trong thực tế. Tính hiệu quả của thuật toán đề xuất được xác nhận lại bằng các kết quả mô phỏng trên MatLab/Simulink

cho thấy Robot 3 bậc tự do đã bám sát quỹ đạo đặt trong thời gian yêu cầu. Phương pháp đề xuất có thể được sử dụng cho các Robot có số bậc tự do lớn hơn và các tác nghiệp linh hoạt hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Frank L.Lewis, Darren M.Dawson, Chaouki T. Abdallah, 2004. *Robot Manipulator Control Theory and Practice*. Marcel Dekker.

[2]. R. Kelly, V. Santibanez, A. Loria, 2005. *Control of Robot Manipulators in joint space*. Springer Verlag.

[3]. Sadao Kawamura Mikhail Svinin, 2006. *Advances in Robot Control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg..

[4]. Vo Thu Ha, 2012. *Some control solutions to improve the movement quality of industrial manipulators*. PhD thesis, Hanoi University of Science and Technology.

[5]. Nguyễn Phạm Thục Anh, Thái Hữu Nguyên, 2013. *Ap dụng phương pháp backstepping trong điều khiển ben vung chuyen dong cua Robot*. The 2nd Vietnam International Conference and Exhibition on Control and Automation - VCCA.

[6]. Jean Bosco Mbede, Joseph Jean-Baptiste Mvogo Ahanda, 2014. *Exponential Tracking Control Using Backstepping Approach for Voltage-Based Control of a Flexible Joint Electrically Driven Robot*. Hindawi Publishing Corporation Journal of Robotics Volume 2014, Article ID 241548, 10 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/241548>.

[7]. A. S. Lafmejani, M. T. Masouleh, A. Kalhor, 2018. *Trajectory tracking control of a pneumatically actuated 6-DOF Gough-Stewart parallel robot using backstepping-sliding mode control and geometry-based quasi forward kinematic method*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, vol. 54, pp. 96–114.

[8]. Khurram Ali, Adeel Mehmood, Jamshed Iqbal, 2021. *Fault-tolerant scheme for robotic manipulator - Nonlinear robust back-stepping control with friction compensation*. PLoS ONE 16(8): e0256491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256491>

AUTHOR INFORMATION

Vo Thu Ha

University of Economics - Technology for Industries