

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO HỆ PHI TUYẾN VÀ NHIỀU BIẾN ỨNG DỤNG CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

DESIGN OF A PD CONTROLLER FOR NONLINEAR - MULTIVARIABLE SYSTEM,
APPLICATIONS TO INDUSTRIAL ROBOT

Nguyễn Trường Giang*, Nguyễn Hồng Linh

Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện Lực

*Email: giangnt1@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Các loại robot hiện nay đang được nhiều người quan tâm nghiên cứu và phát triển. Robot ngày càng thông minh, đảm nhận thay thế những công việc mà con người không thể thực hiện như: làm việc trong môi trường có tia phóng xạ, giải cứu con người trong hỏa hoạn, thu thập các thông số của môi trường ở những nơi khắc nghiệt... Việc thiết kế được bộ điều khiển phù hợp đáp ứng được yêu cầu cao về tốc độ điều khiển và độ chính xác điều khiển đóng vai trò quan trọng. Nội dung của nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng bộ điều khiển tỷ lệ-vi phân (PD) cho hệ phi tuyến và nhiều biến. Mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát.

Từ khóa: Điều khiển Robot; Hệ phi tuyến; Hệ nhiều biến; Matlab Simulink.

ABSTRACT

Robots are the focus of extensive research and development. Robots are becoming increasingly intelligent, enabling them to perform tasks that humans cannot, for example, operating in radioactive environments, rescuing people from fires, and collecting environmental data in extreme conditions. Achieving these capabilities hinges on controllers that can deliver both high speed response and high positional accuracy. This study therefore develops a proportional-derivative (PD) control scheme for nonlinear, multivariable systems. As a representative case, an industrial robot with two rotary (RR) joints is modeled and used to demonstrate the design and implementation of the proposed PD controller.

Keywords: Robot controller; Nonlinear system; Multivariable system; Matlab Simulink.

1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ và các hệ thống máy móc hiện đại, các robot đang không ngừng phát triển về số lượng cũng như khả năng của chúng. Robot ngày càng thông minh, đảm nhận thay thế những công việc mà con người không thể thực hiện như: làm việc trong môi trường có tia phóng xạ, giải cứu con người trong hỏa hoạn, thu thập các thông số của môi trường ở những nơi khắc nghiệt.... Các loại robot ngày càng linh hoạt hơn do chúng được điều khiển bởi bộ xử lý trung tâm được tích hợp thêm các bộ điều khiển thông minh.

Việc nghiên cứu, tìm hiểu chuyên sâu về robot và phương pháp điều khiển robot đòi hỏi người nghiên cứu có những kiến thức sâu về lĩnh vực cơ khí, điện tử, công nghệ thông tin. Năm 2015, Hoàng Xuân Vinh [1] đã mô phỏng và thực nghiệm điều khiển robot song song Hexapod 6 bậc tự do với các giải thuật điều khiển PID, điều khiển mờ trực tiếp (Direct Fuzzy - PD), điều khiển tự chỉnh định Fuzzy – PID cho từng khâu dẫn động. Năm 2021, Trần Xuân Tình và đồng nghiệp đã thực hiện việc xây dựng bộ điều khiển tốc độ cho hệ nhiều động cơ bằng phương pháp điều khiển cuộn chiều. Các tác giả đã xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab/Simulink [2]. Năm 2022, Phạm Đình Bá và Phan Văn Dương đã thiết kế bộ điều khiển PID để giải quyết bài toán bám quỹ đạo của robot di động với 3 bánh xe đa hướng. Bộ điều khiển đã được đánh giá thông qua việc sử dụng phần mềm Matlab/Simulink [3].

Tuy nhiên, việc tập trung xây dựng bộ điều khiển cho hệ phi tuyến và nhiều biến chưa được nhiều nghiên cứu đề cập đến. Trong

nghiên cứu này, bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và nhiều biến đã được thiết kế và ứng dụng cho mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR). Các hệ số K_{p1} , K_{p2} , K_{D1} và K_{D2} được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Với bộ điều khiển PD đã thiết kế, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ.

2. PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ROBOT CÔNG NGHIỆP

Trong thực tế, phương trình động lực học của Robot công nghiệp thường là các phương trình phức tạp, phi tuyến và nhiều biến. Trong nghiên cứu này, bài toán điều khiển Robot công nghiệp được xem xét với mô hình điều khiển phi tuyến và nhiều biến. Phương trình động lực học tổng quát của Robot công nghiệp có thể được thiết lập như sau:

$$\sum_{j=1}^n J_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{q}_j + G_i + F_{fi} + F_{ext} = F_i \quad (1)$$

$$J_{mi} \ddot{\theta}_{mi} + (B_{mi} + K_{bi} K_{mi} / R_i) \dot{\theta}_{mi} = (K_{mi} / R_i) V_i - F_i / r_i$$

Sau một số phép biến đổi với chú ý $\theta_{mi} = r_i q_i$, ta đưa phương trình (1) về dạng sau:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + B \dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}) + F_{ex} = u \quad (2)$$

Trong đó:

$M(q) = J(q) + J_m$ với J_m là ma trận đường chéo với các phần tử $r_i^2 J_{mi}$;

B là ma trận đường chéo với các phần tử $B_{mi} + K_{bi} K_{mi} / R_i$;

u là vector tín hiệu vào với các phần tử

$$u_i = \frac{r_i K_{mi}}{R_i} V_i \text{ có thứ nguyên của moment.}$$



3. LÝ THUYẾT XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

Bộ điều khiển PD để điều khiển vị trí được thiết lập để điều khiển cho Robot công nghiệp trong trường hợp tổng quát với luật điều khiển như sau:

$$u = K_p \tilde{q} - K_D \dot{q} \quad (3)$$

Trong đó, $\tilde{q} = q^d - q$ là vector sai số giữa chuyển vị mong muốn q^d và chuyển vị thực của khớp q . K_p , K_D tương ứng là ma trận đường chéo của các hệ số tỉ lệ và vi phân. Để đánh giá sai số trong trạng thái xác lập của bộ điều khiển, ta sử dụng tiêu chuẩn đánh giá Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} \quad (4)$$

Nhóm thứ nhất trong phương trình (4) là động năng của Robot công nghiệp và nhóm thứ hai đại diện cho thành phần phản hồi hữu tỉ $K_p \tilde{q}$. Trong phương trình (4), V chính là tổng động năng của cơ hệ ở vị trí cân bằng q^d mà khi thay các cơ cấu chấp hành của các khớp bằng các lò xo với độ cứng biểu diễn bởi ma trận K_p . Khi đó, V là một hàm không âm và $V = 0$ khi $q = q^d$ và $\dot{q} = 0$. Điều này chứng tỏ rằng với một vị trí xác định nào đó cho trước thì V sẽ tiến tới 0 hay nói cách khác là Robot công nghiệp có thể chuyển động tới một vị trí bất kỳ cho trước. Để chứng minh cho điều này, ta đạo hàm hai vế của phương trình (4) theo thời gian, với chú ý J_m và q^d là hằng số, ta có:

$$\dot{V} = \dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{J}(q) \dot{q} - \dot{q}^T K_p \tilde{q} \quad (5)$$

Trước hết, để đơn giản bài toán, chúng ta giả thiết $B = 0$, $G(q) = 0$, $F_f(\dot{q}) = 0$, và $F_{ex} = 0$ trong phương trình (2). Từ đó, ta có:

$$M(q) \ddot{q} = u - C(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (6)$$

Từ phương trình (5) và (6), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{q}^T [u - C(q, \dot{q}) \dot{q}] + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{J}(q) \dot{q} - \dot{q}^T K_p \tilde{q} \\ &= \dot{q}^T [u - K_p \tilde{q}] + \frac{1}{2} \dot{q}^T [J(q) - 2C(q, \dot{q})] \dot{q} \end{aligned} \quad (7)$$

Hoàn toàn có thể chứng minh được $\dot{q}^T [J(q) - 2C(q, \dot{q})] \dot{q} = 0$ nên, ta có:

$$\dot{V} = \dot{q}^T [u - K_p \tilde{q}] \quad (8)$$

Thế luật điều khiển trong phương trình (3) vào phương trình (8), ta có:

$$\dot{V} = -\dot{q}^T K_D \dot{q} \leq 0 \quad (9)$$

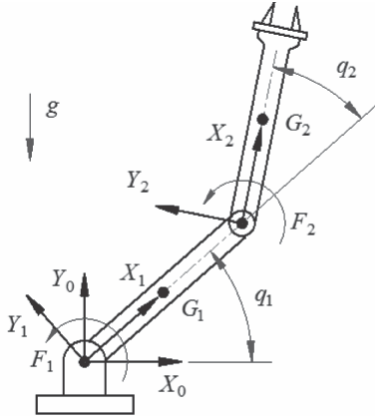
Việc phân tích ở trên chứng tỏ rằng V luôn giảm khi $\dot{q} \neq 0$ và Robot công nghiệp sẽ tiếp cận tới một vị trí cân bằng nào đó khi $\dot{V} = 0 \rightarrow \dot{q} = 0$ khi đó $\ddot{q} = 0$. Từ phương trình chuyển động kết hợp với điều khiển PD, ta có:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} = -K_p \tilde{q} - K_D \dot{q} \rightarrow -K_p \tilde{q} = 0 \quad (10)$$

Phương trình (10) hàm ý rằng khi $\dot{q} = 0$ thì $\tilde{q} = 0$ hay $q = q^d$. Theo định lý LaSalle thì sự cân bằng này là ổn định tiệm cận.

4. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP RR

Trong nghiên cứu này, mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát. Mô hình Robot công nghiệp RR (Robot RR) được mô tả như trên Hình 1 với các thông số kỹ thuật được lựa chọn như trong Bảng 1.



Hình 1. Robot công nghiệp RR

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của mô hình Robot công nghiệp RR

Khối lượng các khâu: $m_1 = m_2 = 1\text{kg}$ Chiều dài các khâu: $l_1 = l_2 = 1\text{m}$ Điện trở phản ứng động cơ: $R = 1\Omega$ Moment quán tính phân ứng: $J_m = 1\text{kgm}^2$ Điện áp phản ứng: $V = 10\text{V}$	Hệ số sức phản điện động: $K_b = 1\text{Vs/rad}$ Hệ số moment: $K_m = 1\text{Nm/A}$ Tỷ số truyền từ động cơ đến các khớp: $r = 100$ Hệ số cản của cơ cấu dẫn động: $B_m = 1\text{Nms/rad}$ Gia tốc trọng trường: $g = 10\text{m/s}^2$
--	---

Hệ phương trình vi phân chuyển động cho Robot RR được thiết lập như sau:

$$\left(\frac{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2}{3} + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 c q_2\right) \ddot{q}_1 + \left(\frac{m_2 l_2^2}{3} + \frac{m_2 l_1 l_2 c q_2}{2}\right) \ddot{q}_2 - m_2 l_1 l_2 s q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - \frac{m_2 l_1 l_2 s q_2}{2} \dot{q}_2^2 - \left(\frac{m_1}{2} + m_2\right) l_1 g c q_1 - \frac{m_2}{2} l_2 g c (q_1 + q_2) = F_{ex1} \quad (11)$$

$$\left(\frac{m_2 l_2^2}{3} + \frac{m_2 l_1 l_2 c q_2}{2}\right) \ddot{q}_1 + \frac{m_2 l_2^2}{3} \ddot{q}_2 + \frac{m_2 l_1 l_2 s q_2}{2} \dot{q}_1^2 - \frac{m_2}{2} l_2 g c (q_1 + q_2) = F_{ex2}$$

Hệ phương trình 11 có thể được mô tả theo dạng phương trình (2) như sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}) + F_{ex} = u \quad (12)$$

Trong đó:

$$M(q) = \begin{bmatrix} \frac{304}{3} + c q_2 & \frac{1}{3} + \frac{1}{2} c q_2 \\ \frac{1}{3} + \frac{1}{2} c q_2 & \frac{301}{3} \end{bmatrix}; C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -s q_2 \dot{q}_2 & -\frac{1}{2} s q_2 \dot{q}_2 \\ \frac{1}{2} s q_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

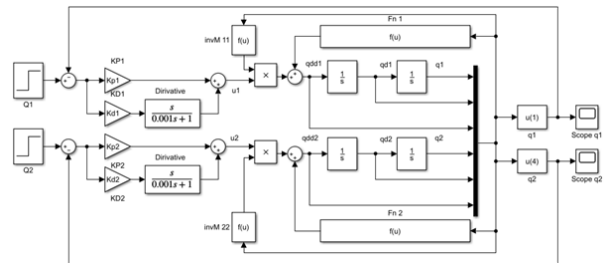
$$B = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}; G(q) = \begin{bmatrix} -15c q_1 - 5c(q_1 + q_2) \\ -5c(q_1 + q_2) \end{bmatrix}; F_f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; F_{ex} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 - q_1^d \\ q_2 - q_2^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{D1} & 0 \\ 0 & K_{D2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

Để thuận lợi hơn cho việc xây dựng mô hình bằng Matlab Simulink, phương trình (12) được biến đổi về dạng sau:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)[u - C(q, \dot{q})\dot{q} - B\dot{q} - G(q) - F_f(\dot{q}) - F_{ex}] = M^{-1}(q)u + F_n \quad (13)$$

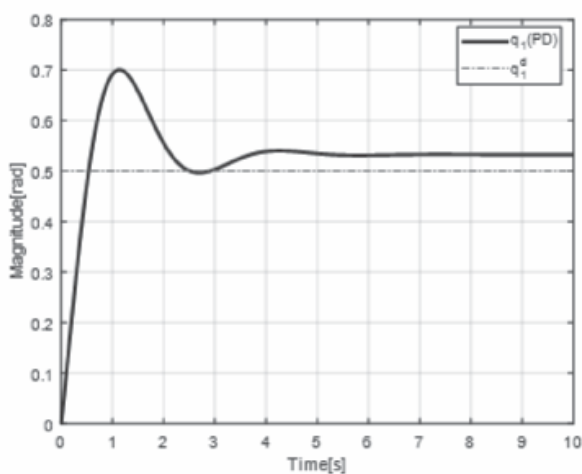
Giả thiết, thiết kế bộ điều khiển PD để điều khiển Robot tới vị trí $q_1 = 0.5\text{rad}$, $q_2 = 0.3\text{rad}$. Sơ đồ khối bộ điều khiển PD cho Robot RR được xây dựng trên phần mềm Matlab Simulink được mô tả như Hình 2. Các hệ số K_{p1} , K_{p2} , K_{D1} và K_{D2} của bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và hai biến được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Các hệ số tối ưu được xác định như sau: $K_{p1} = 500$, $K_{p2} = 500$, $K_{D1} = 200$ và $K_{D2} = 200$.



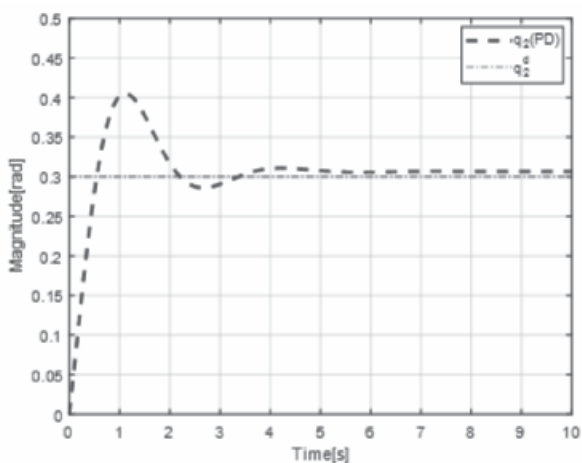
Hình 2. Sơ đồ khối bộ điều khiển PD cho Robot RR

Đáp ứng bước của bộ điều khiển PD cho Robot RR được mô tả chi tiết như Hình 3. Trên Hình 3 (a), đường nét liền thể hiện giá trị điều khiển thực tế của góc khớp 1 và đường chấm gạch thể hiện giá trị mong muốn. Trên

Hình 3 (b), đường nét đứt thể hiện giá trị điều khiển thực tế của góc khớp 1 và đường chấm gạch thể hiện giá trị mong muốn. Kết quả mô phỏng đáp ứng bước của 2 khớp cho thấy, thời gian vọt lố (Peak time) xảy ra khoảng 1 giây, độ vọt lố (Overshoot) lên tới khoảng 33÷36% sau đó dao động nhẹ, giảm dần và ổn định sau khoảng 4 giây. Với bộ điều khiển PD, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ.



a) Đáp ứng bước của khớp 1



b) Đáp ứng bước của khớp 2

Hình 3. Đáp ứng bước của bộ điều khiển PD cho Robot RR

4. KẾT LUẬN

Nội dung của nghiên cứu đã xây dựng được bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và nhiều biến. Mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát. Các hệ số K_{P1} , K_{P2} , K_{D1} và K_{D2} của bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và hai biến được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Với bộ điều khiển PD đã thiết kế, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 28/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Xuân Vinh (2015), “Tối ưu hóa thiết kế và điều khiển tay máy song song kiểu Stewart Gough Platform”. Luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tử, Viện Nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa.
- [2]. Trần Xuân Tình, Đặng Tiến Trung, Lê Văn Sâm, Nguyễn Ngọc Tuyền, “Xây dựng bộ điều khiển tốc độ cho hệ nhiều động cơ bằng phương pháp điều khiển cuộn chiếu”. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 25 (2021), 17-23.
- [3]. Phạm Đình Bá và Phan Văn Dương, “Mô hình toán học và thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho Robot di động sử dụng cơ cấu lái với 3 bánh xe đa hướng”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng, số 69 (01-2022), 45-50.