

## An Effective Adaptive Computed Torque PID Controller for Robotic Manipulators

Vo Nguyen Thong, Nguyen Hai Phong, Nguyen Dang Hung Phu, Dang Sy Binh, Dang Xuan Ba\*  
HCMC University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam

\* Corresponding author. Email: [badx@hcmute.edu.vn](mailto:badx@hcmute.edu.vn)

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 25/12/2021	Precise control of industrial manipulators has always been the primary research goal of robotics companies as well as academics. However, uncertainties in the system kinematics/dynamic models and unpredictable internal and external disturbances that arise as the systems operate are major barriers to access outstanding controllers. In this paper, we introduce an adaptive controller based on the computed-torque control structure for robotic manipulators. First, uncertain parameters such as load, link mass, and coefficients of friction, which appear in the nonlinear dynamics model of the robot, are estimated online and used in a model-compensation signal. To ensure convergence of both the main control error and the adaptive process, a proportional-integral-derivative (PID) control signal is used. Stability of the closed system and the convergence of the estimated parameters as well as the effectiveness of the controller were intensively investigated both by theoretical proof and simulation validation.
Revised: 10/3/2022	
Accepted: 30/5/2022	
Published: 30/8/2022	
KEYWORDS	
PID Controller;	
Computed Torque Control;	
Robotics;	
Manipulators;	
Adaptive Control.	

## Xây Dựng Bộ Điều Khiển PID Thích Nghi cho các Tay Máy Robot dựa trên Cấu Trúc Điều Khiển Bù Thông Số Mô Hình

Võ Nguyên Thông, Nguyễn Hải Phong, Nguyễn Đặng Hùng Phú, Đặng Sỹ Bình, Đặng Xuân Ba\*

*Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM, Việt Nam*

\* Tác giả liên hệ. Email: [badx@hcmute.edu.vn](mailto:badx@hcmute.edu.vn)

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 25/12/2021	Điều khiển chính xác các tay máy công nghiệp luôn là mục tiêu nghiên cứu hàng đầu của các công ty robot cũng như các học giả. Tuy nhiên, các yếu tố không chắc chắn trong mô hình động học/động lực học hệ thống và các nhiễu động không dự đoán trước được bên trong lẫn bên ngoài xuất hiện khi hệ thống vận hành là những rào cản chính trong việc tiếp cận các chất lượng điều khiển vượt trội của các loại robot này. Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu một bộ điều khiển thích nghi dựa trên cấu trúc điều khiển bù momen mô hình của các tay máy robot. Trước tiên, các thông số không chắc chắn như tải trọng, khối lượng của khâu, và các hệ số ma sát, xuất hiện trong mô hình động lực học phi tuyến của robot sẽ được ước lượng trực tuyến và được sử dụng để bù các nhiễu động nội tại trong quá trình điều khiển robot. Để đảm bảo sự hội tụ của cả sai số điều khiển chính và quá trình thích nghi, một tín hiệu điều khiển vi-tích-phân-tỉ-lệ (PID) sẽ được sử dụng. Tính ổn định của hệ thống kín và sự hội tụ của các thông số ước lượng cũng như hiệu quả của bộ điều khiển sẽ được khảo sát một cách chi tiết trên cả phương diện chứng minh lý thuyết và mô phỏng kiểm chứng.
Ngày hoàn thiện: 10/3/2022	
Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2022	
Ngày đăng: 30/8/2022	
TỪ KHÓA	
Bộ điều khiển PID;	
Điều khiển khử thông số mô hình;	
Robot;	
Tay máy;	
Điều khiển thích nghi.	

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.71B.2022.1109>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

## 1. Giới thiệu

Trong kỹ thuật điều khiển robot, phương pháp điều khiển bù momen mô hình có thể đạt được độ chính xác cao tùy ý bằng việc sử dụng thông tin mô hình động lực học của robot trong việc xây dựng các luật điều khiển [1]-[2]. Cấu trúc điều khiển này giúp cho hệ thống có thể khử đi các nhiễu động và bám đuổi theo các quỹ đạo mong muốn một cách đồng nhất trong tất cả các cấu hình của robot. Tuy nhiên, có một số khó khăn nhất định trong việc áp dụng bộ điều khiển này trên thực tế và có thể làm giảm chất lượng điều khiển mong muốn. Thứ nhất, mô hình động lực học của robot phải được tính toán một cách đủ nhanh để thời gian lấy mẫu điều khiển hệ thống không làm ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Tức là hệ thống vi xử lý điện tử phải đủ mạnh, điều này là một khuyết điểm nếu so với bộ điều khiển PID thông thường. Thứ hai, giá trị các thông số trong mô hình động lực học được sử dụng trong luật điều khiển phải đúng với giá trị thực tế.

Ngày nay, sự phát triển không ngừng về tỉ lệ sức mạnh/chi phí của các hệ vi xử lý áp dụng cho việc điều khiển robot công nghiệp đã hầu như khắc phục được vấn đề thứ nhất [3]-[5]. Đối với vấn đề thứ hai, mô hình động lực học của hệ thống có thể chia làm hai phần: thành phần biết trước, bao gồm cả các hệ số biết trước, và thành phần chưa biết trong đó cấu trúc đã biết nhưng các hệ số chưa biết. Ví dụ, các thành phần đã biết trong mô hình robot như độ dài hoặc momen quán tính của các khâu, trong khi đó hệ số ma sát tại các khớp và hiệu ứng momen quán tính của tải là các thành phần chưa biết. Các thành phần ma sát và tải còn thường xuyên thay đổi theo thời gian.

Để giải quyết vấn đề mô hình hóa trong điều khiển robot. Có nhiều hướng tiếp cận thú vị đã được đề xuất. Trong nghiên cứu [6], tác giả đã rời rạc hóa mô hình của robot sử dụng phương pháp xấp xỉ sai phân đơn giản cho các toán tử đạo hàm. Cấu hình điều khiển thích nghi sử dụng các luật học bình phương tối thiểu đã được sử dụng trong [7], tuy nhiên các vấn đề liên quan đến tính ổn định của hệ kín đã không được khảo sát triệt để và thông tin về thời gian lấy mẫu để điều khiển cũng bị bỏ qua. Trong nghiên cứu [8], tác giả sử dụng mô hình phân tách tuyến tính cho các khâu của robot. Kết quả là cách tiếp cận này chỉ có áp dụng trong trường hợp bỏ qua các thành phần phi tuyến và các thông số hệ thống được giả định thay đổi rất chậm theo thời gian. Trong nghiên cứu [9], phương pháp điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu cũng đã được đề xuất ở đó các thông số hệ thống cũng được giả định là thay đổi rất chậm theo thời gian. Nghiên cứu [10] trình bày một hướng tiếp cận biến đổi phi tuyến cho mô hình động lực học, tuy nhiên việc đánh giá hiệu quả làm việc của hệ thống khá khó khăn. Nghiên cứu [11] hoàn toàn bỏ qua các yếu tố phi tuyến của mô hình robot, mà chỉ xem xét mô hình này theo hướng tiếp cận tuyến tính. Tính ổn định của hệ kín chỉ đúng khi các hệ số chưa biết của mô hình là các hằng số. Việc xem xét tính ổn định của hệ kín của các luật điều khiển thích nghi phi tuyến bằng các lý thuyết điều khiển thích nghi được khảo sát một cách khá hoàn chỉnh trong nghiên cứu [12]. Nghiên cứu [13] tác giả đề xuất một phương pháp là bù momen ma sát để giảm thiểu ảnh hưởng của nó lên mô hình, tuy nhiên cần phải hiểu rõ tính phi tuyến, cấu trúc của mô hình và giả định các thông số của mô hình đều đã được xác định trước. Do có sự kết hợp giữa nhiều luật điều khiển nên việc xây dựng thuật toán cũng gặp khó khăn. Nghiên cứu [14] có kết quả mô phỏng với sai số xác lập nhỏ, tuy nhiên vẫn còn hạn chế về giá trị của các thông số mô hình như khối lượng, hệ số ma sát,... và cách lựa chọn các thông số điều khiển còn dựa vào kinh nghiệm của người nghiên cứu.

Bài báo này sẽ trình bày cấu hình điều khiển thích nghi cho các tay máy robot sử dụng các thông tin đã biết trong mô hình động lực học của hệ thống và đồng thời cũng ước lượng các hệ số chưa biết. Hệ thống điều khiển thích nghi này sử dụng luật điều khiển PID bù momen mô hình (PID CTC) và được thêm vào các yếu tố thích nghi khác. Để đạt được hiệu quả học trực tuyến, giải thuật điều khiển này sẽ phân tách và tuyến tính hóa mô hình động lực học của robot trở thành những hệ thống bậc hai đơn giản. Tín hiệu điều khiển PID vừa có tác dụng dẫn dắt mục tiêu điều khiển về góc tọa độ, vừa có tác dụng tăng cường khả năng thích nghi của hệ thống. Tính ổn định của hệ thống kín và hiệu quả điều khiển được khảo sát một cách toàn diện thông qua các phân tích lý thuyết chuyên sâu và các kết quả mô phỏng kiểm chứng.

Bố cục của bài báo được sắp xếp như sau: *Phần 1* trình bày các khảo sát tổng quan và các đóng góp của bài báo; *Phần 2* trình bày mô hình động lực học của tay máy robot và vấn đề điều khiển cần giải quyết; *Phần 3* trình bày chi tiết quá trình thiết kế bộ điều khiển và các phân tích lý thuyết liên quan; *Phần 4* thảo luận về các kết quả mô phỏng; và các kết luận được tóm tắt lại ở *Phần 5*.

## 2. Đặt vấn đề

Một tay máy robot được mô hình hóa như là một tập hợp các khâu cứng chắc kết nối với nhau dưới dạng chuỗi nối tiếp với các lực ma sát hoạt động tại các khớp. Phương trình chuyển động của hệ thống này có thể được viết dưới dạng đơn giản như sau:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + Q(q, \dot{q}) \quad (1)$$

Trong đó,  $\tau \in \mathcal{R}^n$  là vector momen xoắn từ các cơ cấu chấp hành,  $q \in \mathcal{R}^n$  là vector vị trí khớp.  $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ , là ma trận đối xứng xác định dương được gọi là ma trận khối lượng của robot. Vector  $Q(q, \dot{q})$  đại diện các momen xoắn ly tâm, Coriolis, trọng trường, và thành phần ma sát.

Phương trình (1) có thể chia ra thành các thành phần đã biết và các thành phần chưa biết như sau:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + Q_u(q, \dot{q}) + Q_k(q, \dot{q}) \quad (2)$$

Trong đó  $Q_k$  là thành phần đã biết, và  $Q_u$  là thành phần biết rõ cấu trúc nhưng chưa biết chính xác được giá trị của các hệ số.

Từ (2), ta có thể chuyển đổi về dạng tổng của các tích sau:

$$\tau = W(q, \dot{q}, \ddot{q})Z + Q_k(q, \dot{q}) \quad (3)$$

Trong đó, các thành phần  $Z = [z_1, z_2, \dots, z_m] \in \mathcal{R}^m$  là vector chứa các hệ số được tổng hợp từ các tích của các thành phần như khối lượng các khâu, các phần tử momen quán tính, vị trí của trọng tâm các khâu, hệ số ma sát và các hệ số gia tốc trọng trường. Ma trận  $W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in \mathcal{R}^{n \times m}$  là ma trận chứa các hàm biểu diễn các phần tử của cấu trúc động lực học của robot. Trong nghiên cứu này, chúng tôi giả sử rằng cấu trúc của các hệ số và các hàm động lực học là biết trước, nhưng giá trị của tất cả các hệ số trong  $z_i$  là chưa biết. Tuy nhiên, chúng ta có thể giả sử rằng các giá trị biên của các hệ số này là biết trước, mặt dù các ràng buộc của các giá trị biên này có thể không cần phải quá chặt chẽ. Thực tế thì chỉ những thông tin chúng ta cần biết theo các biên này là những thông số chắc chắn đại diện cho momen quán tính, vì vậy chúng sẽ là các số dương.

*Chú ý 1:* Vấn đề điều khiển được đặt ra ở đây là xây dựng một bộ điều khiển hợp lý có thể đảm bảo được chất lượng điều khiển cao trong trường hợp các thông số mô hình không biết trước. Ngoài ra, các thông số điều khiển có thể được ước lượng chính xác thông qua quá trình thích nghi và điều khiển song song.

## 3. Thiết kế bộ điều khiển PID thích nghi với khả năng khử thông số mô hình (APIDCTC)

Trong phần này, chúng tôi sẽ trình bày một cách chi tiết quá trình thiết kế bộ điều khiển PID với tính năng khử nhiễu động mô hình để giải quyết vấn đề được đặt ra ở trên. Các đặc tính thích nghi sau đó sẽ được tích hợp cho việc ước lượng các thông số chưa biết.

### 3.1. Cấu trúc điều khiển PID khử thông số mô hình (PIDCTC)

Để điều khiển tay máy robot, chúng ta có thể sử dụng luật điều khiển như sau:

$$\tau = \hat{M}(q)\ddot{q}^* + \hat{Q}_u(q, \dot{q}) + Q_k(q, \dot{q}) \quad (4)$$

Trong đó,  $\hat{M}(q)$  và  $\hat{Q}_u(q, \dot{q})$  lần lượt là các giá trị ước lượng của  $M(q)$  và  $Q(q, \dot{q})$ , và

$$\ddot{q}^* = \ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e d\varsigma \quad (5)$$

Trong (5), sai số điều khiển,  $e = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$ , được định nghĩa như sau:

$$e = q_d - q \quad (6)$$

Với  $K_v, K_p, K_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là các ma trận đường chéo hằng số với  $K_v, K_p$  và  $K_i$  là các hệ số trên đường chéo. Quỹ đạo mong muốn của robot được giả định là biết trước với các hàm theo thời gian của vị trí, vận tốc và gia tốc khớp,  $q_d(t)$ ,  $\dot{q}_d(t)$  và  $\ddot{q}_d(t)$ .

Phương trình (4) có thể được viết lại dưới dạng tổng của các tích sau:

$$\tau = W(q, \dot{q}, \ddot{q}^*) \hat{Z} + Q_k(q, \dot{q}) \quad (7)$$

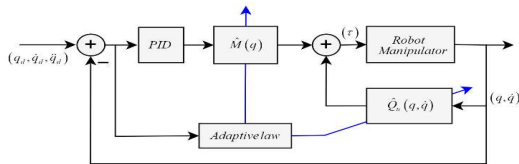
Trong đó các  $\hat{Z}$  là giá trị ước lượng của  $Z$ .

Luật điều khiển (4) được lựa chọn bởi vì trong các tình huống sử dụng các thông tin hoàn hảo của mô hình động lực học của hệ thống trong môi trường không nhiễu động, sai số điều khiển của hệ điều khiển vào kín sẽ có dạng như sau:

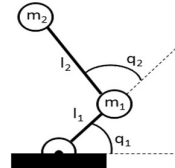
$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e d\varsigma = 0 \quad (8)$$

Khi đó, trong tình huống lý tưởng này, các giá trị  $K_v, K_p$  và  $K_i$  có thể được lựa chọn để đạt được các cực mong muốn của hệ kín của các khớp, và việc khử các nhiễu động môi trường sẽ đồng đều trên toàn bộ không gian làm việc của robot.

*Chú ý 2:* Sơ đồ khối của bộ điều khiển được phác họa ở Hình 1, ở đó có thể thấy được bộ điều khiển đã sử dụng thông tin mô hình động lực học của robot trong quá trình điều khiển. Đồng thời, một phần tử thích nghi cũng được tích hợp vào hệ thống. Phần tử thích nghi này quan sát sai số điều khiển và điều chỉnh các hệ số xuất hiện trong luật điều khiển (4). Phần còn lại của mục này sẽ thảo luận việc thiết kế cơ chế thích nghi, tính ổn định toàn cục và các yếu tố liên quan khác.



**Hình 1.** Cấu trúc bộ điều khiển được PID khử thông số mô hình với phần tử thích nghi



**Hình 2.** Cấu hình robot hai bậc tự do dùng để kiểm chứng bộ điều khiển thích nghi khử thông số mô hình

### 3.2. Cơ chế thích nghi

Khi các giá trị ước lượng của các hệ số mô hình khác với các giá trị thực của chúng, hệ thống vòng kín sẽ không thực thi như biểu thức (8). Bằng việc kết hợp (1) và (4), chúng ta có

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e d\varsigma = \tilde{M}^{-1}(q) (\tilde{M}(q) \ddot{q} + \tilde{Q}_u(q, \dot{q})) \quad (9)$$

Trong đó,  $\tilde{M}(q) = M(q) - \hat{M}(q)$  và  $\tilde{Q}_u = Q(q, \dot{q}) - \hat{Q}_u(q, \dot{q})$  là các sai số ước lượng của mô hình động lực học.

Từ giả định việc phân tích mô hình động lực học của robot thành dạng tổng của các tích, chúng ta có một dạng biến đổi khác của (9) như sau:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e d\varsigma = \tilde{M}^{-1}(q) W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{Z} \quad (10)$$

trong đó,  $\tilde{Z}$  là vector sai số ước lượng:

$$\tilde{Z}_j = Z_j - \hat{Z}_j \quad (11)$$

*Chú ý 3:* Từ phương trình (9) hoặc (10) có thể thấy rằng, các sai số mô hình hóa của mô hình động lực học hệ thống sẽ ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển của các khớp. Thực chất đây là một hạn chế lớn của phương pháp điều khiển khử momen mô hình robot [1]-[6]. Để khắc phục nhược điểm này, chúng ta có thể sử dụng các luật học thích nghi phù hợp để tự động tìm ra các hệ số hệ thống trong quá trình điều khiển.

*Chú ý 4:* Trong phần phân tích dưới đây, chúng ta cần xem xét tính hữu hạn của thành phần  $\hat{M}^{-1}(q)W$ . Vì  $W$  được tổng hợp từ các hàm hữu hạn của quỹ đạo của robot, nên  $W$  sẽ hữu hạn nếu quỹ đạo của robot được đảm bảo ổn định [21], [23]. Ma trận  $\hat{M}(q)$  sẽ xác định dương và khả nghịch nếu chúng ta đảm bảo các hệ số khối lượng của hệ thống là dương. Với phân tích này, chúng ta sẽ giới hạn giá trị ước lượng của các thông số hệ thống trong các giới hạn hữu hạn như sau:

$$l_i - \delta_i < z_i < h_i + \delta_i \quad (12)$$

trong đó, chúng ta biết rằng giá trị thực sự của  $z_i$  nằm giữa  $l_i$  và  $h_i$ , và  $\delta_i$  là một số dương nhỏ tùy ý sao cho ma trận  $\hat{M}^{-1}(q)$  hữu hạn miễn là thỏa mãn (12).

Luật thích nghi sẽ được tính toán dựa trên sự thay đổi của sai số điều khiển. Ta đặt các vector trạng thái sau  $x = [y_j \quad \dot{y}_j \quad \ddot{y}_j]^T \in \mathcal{R}^{3 \times n}$ , với  $y = \int_0^t e d\varsigma$ . Từ đây, phương trình động lực sai số điều khiển

(10) có thể biểu diễn dưới dạng hệ phương trình trạng thái sau:

$$\dot{x} = Ax + B\hat{M}^{-1}(q)(W(q, \dot{q}, \ddot{q})\tilde{Z}) \quad (13)$$

trong đó,  $A$  là ma trận quá độ có cấu trúc sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -K_i & -K_p & -K_v \end{bmatrix} \quad (14)$$

và  $B = [0_{n \times n} \quad 0_{n \times n} \quad I_{n \times n}]^T$  là ma trận độ lợi ngõ vào.

Chú ý rằng, với mọi  $K_p$ ,  $K_v$  và  $K_i$  xác định dương sao cho  $A$  là ma trận Hurwitz, luôn tồn tại hai ma trận xác định dương  $P$  và  $Q$  thỏa mãn điều kiện sau [20], [22], [24]:

$$A^T P + P A = -Q \quad (15)$$

Từ phương trình trạng thái (13) và điều kiện ổn định của hệ thống (15) ta có thể lựa chọn luật học thích nghi cho các hệ số mô hình tại các khớp  $j$  như sau:

$$\dot{\tilde{Z}} = \Gamma W^T(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{M}^{-1}(q)B^T P x \quad (16)$$

trong đó  $\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m)$  là ma trận đường chéo xác định dương chứa các hằng số tốc độ học.

### 3.3. Đánh giá tính ổn định của hệ kín

Để phân tích tính ổn định của hệ thống kín, ta sẽ khảo sát hàm Lyapunov sau [13]-[14], [23]-[25]:

$$L = x^T P x + \tilde{Z}^T \Gamma^{-1} \tilde{Z} \quad (17)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov trên theo thời gian ta được:

$$\dot{L} = x^T A^T P x + x^T P A x + 2\tilde{Z}^T \left( W^T(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{M}^{-1}(q)B^T P x + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{Z}} \right) \quad (18)$$

Kết hợp (15) và (16), ta có thể đơn giản hóa hàm (18) như sau:

$$\dot{L} = -x^T Q x \leq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^{3n} \quad (19)$$

Vì  $Q$  là hàm xác định dương, nên biến thiên của hàm Lyapunov (17) theo thời gian là không dương, do đó  $x$  và  $\tilde{Z}$  sẽ hữu hạn.

*Chú ý 5:* Lưu ý rằng luật thích nghi (16) chỉ đảm bảo các hệ số ước lượng của hệ thống hữu hạn. Để giá trị ước lượng của các hệ số này nằm trong miền giới hạn (12), các phép chiếu thích nghi có thể được áp dụng [24]-[25]. Tuy nhiên, để đảm bảo điều kiện (12) được thỏa mãn một cách chặt chẽ trong mọi trường hợp, chúng tôi sử dụng điều kiện cài đặt lại như sau:

$$\begin{cases} \hat{z}_i(t^+) = l_i & \text{if } \hat{z}_i(t^+) \leq l_i - \delta_i \\ \hat{z}_i(t^+) = h_i & \text{if } \hat{z}_i(t^+) \geq h_i + \delta_i \end{cases} \quad (20)$$

Từ (20) có thể thấy, nếu các giá trị ước lượng rơi ra khỏi miền giới hạn của chúng một khoảng  $\delta_i$ , nó sẽ được đặt lại trên các giá trị biên gần nhất của nó. Hành vi cài đặt lại các thông số ước lượng này sẽ tạo ra một sự thay đổi bước trên  $\hat{Z}$  trong mô hình hệ kín (13). Điều này không tạo ra sự thay đổi tức thời trên biến trạng thái  $x$  [21], [25].

*Chú ý 6:* Một lưu ý khác là gia tốc góc thực tế  $\ddot{q}$  của robot xuất hiện trong luật học thích nghi của các hệ số khối lượng. Tuy nhiên, chúng ta không cần sử dụng các cảm biến gia tốc để đo các thông tin này, chúng ta có thể xấp xỉ nó từ thông tin vận tốc góc hay vị trí góc. Chắc chắn rằng việc xấp xỉ các giá trị gia tốc góc sẽ tạo ra các sai lệch bởi nhiễu đo lường và tính rời rạc hóa, nhưng đặc tính tích phân của luật học (16) và tính ổn định tiệm cận của sai số điều khiển (19) có thể làm giảm các yêu cầu quá cao về độ chính xác của thông tin gia tốc này.

### 3.4. Thảo luận khả năng hội tụ của hệ kín

Nếu bỏ qua điều kiện cài đặt lại hệ số ước lượng (20), chúng ta có thể viết phương trình diễn tả hành vi của hệ kín như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \hat{M}^{-1} W \\ -\Gamma W^T \hat{M}^{-1} B^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{Z} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Thực ra có nhiều nghiên cứu khảo sát về tính ổn định tiệm cận của hệ thống (21). Ví dụ như các nghiên cứu [16]-[17], [23]-[25] cho biết rằng, hệ thống (21) sẽ ổn định tiệm cận đồng đều nếu ma trận  $A$  là ma trận Hurwitz và ma trận  $\hat{M}^{-1}(q)W$  thỏa mãn điều kiện kích thích liên tục:

$$\alpha I \leq \int_s^{s+\rho} (\hat{M}^{-1}(q)W)^T (\hat{M}^{-1}(q)W) dt \leq \beta I \quad (22)$$

cho tất cả  $s$ , trong đó  $\alpha$ ,  $\beta$ , và  $\rho$  là các số dương.

*Chú ý 7:* Trong quá trình ước lượng tham số, tốc độ hội tụ phụ thuộc vào độ dôi dào và khả năng kích thích của tín hiệu học. Vì vậy, việc chọn phương pháp điều khiển PID hỗ trợ không những giúp làm giảm sai số xác lập mà còn làm đa dạng tín hiệu điều khiển tức là tạo thêm điều kiện kích thích liên tục cho quá trình ước lượng. Cuối cùng, vì chúng ta thấy rằng các sai số điều khiển ( $\int e ds, e, \dot{e}$ ) sẽ hội tụ về gốc tọa độ dưới cấu trúc điều khiển này, nên điều kiện kích thích liên tục (22) sẽ có hiệu quả đối với các dạng quỹ đạo biến đổi liên tục và quỹ đạo tĩnh nếu thời gian học đủ lớn.

## 4. Kết quả mô phỏng kiểm chứng

Một tay máy robot hai bậc tự do đơn giản như Hình 2 đã được mô phỏng để kiểm chứng giải thuật điều khiển thích nghi này. Tay máy được mô hình hóa như hai khâu cứng chắc với độ dài  $l_1$  và  $l_2$  và khối lượng được phân bố tại điểm cuối của từng khâu ( $m_1, m_2$ ). Robot sẽ làm việc trong mặt phẳng thẳng đứng với gia tốc trọng trường hướng xuống. Các lực ma sát nhớt được mô hình hóa tại các khớp. Mặc

dù robot này khá đơn giản, nhưng nó chứa đầy đủ các thành phần cần thiết của một robot đa bậc tự do tổng quát bao gồm momen quán tính, thành phần ly tâm, thành phần Coriolis, thành phần trọng trường và các hiệu ứng ma sát.

Phương trình động lực học chi tiết của robot như sau [2]:

$$\begin{cases} \tau_1 = m_2 l_2^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 m_2 \cos(q_2) (2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{q}_1 - m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 (\dot{q}_2 + 2\dot{q}_1) \\ \quad + m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2) + (m_1 + m_2) l_1 g \cos(q_1) + a_1 \dot{q}_1 \\ \tau_2 = m_2 l_2^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 m_2 \cos(q_2) \ddot{q}_1 + m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_1^2 + m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2) + a_2 \dot{q}_2 \end{cases} \quad (23)$$

Chúng ta có thể giả sử rằng các giá trị của  $l_1$ ,  $l_2$  và gia tốc trọng trường  $g$  là biết trước:  $l_1 = 0.2$ ;  $l_2 = 0.3$ ;  $g = 9.81$ . Vì các hệ số  $l_1$ ,  $l_2$  và  $g$  không xuất hiện như các hệ số độc lập, nên ta có thành phần  $Q_k = 0$  trong (2) và (3). Ta có thể sắp xếp lại hệ thống (23) theo dạng của hệ (3) với các hệ số cần ước lượng và ma trận hồi quy như sau như sau:

$$\begin{cases} z = [m_1; m_2; a_1; a_2] \\ W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & 0 \\ 0 & w_{22} & 0 & w_{24} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (24)$$

trong đó,

$$\begin{cases} w_{11} = l_1^2 \ddot{q}_1 + l_1 g \cos(q_1) \\ w_{12} = l_2^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 \cos(q_2) (2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1^2 \ddot{q}_1 + l_1 l_2 \cos(q_2) \dot{q}_2 - l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 (\dot{q}_2 + 2\dot{q}_1) \\ \quad + l_2 g \cos(q_1 + q_2) + l_1 g \cos(q_1) \\ w_{13} = \dot{q}_1 \\ w_{22} = l_2^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 \cos(q_2) \ddot{q}_1 + l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_1^2 + l_2 g \cos(q_1 + q_2) \\ w_{24} = \dot{q}_2 \end{cases} \quad (25)$$

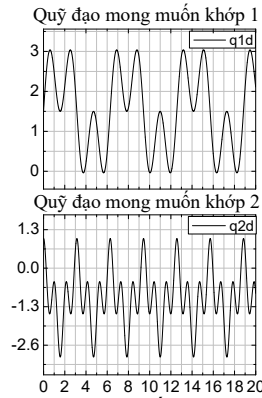
#### 4.1. Thí nghiệm với quỹ đạo biến đổi liên tục

Luật điều khiển được áp dụng từ (4) và luật thích nghi được áp dụng từ (16) và (20). Quỹ đạo mong muốn của các khớp được lựa chọn như sau:  $q_{1,d} = 1.5 + \sin(t) + \sin(3t)$ ;  $q_{2,d} = -1 + \cos(2t) + \cos(6t)$ .

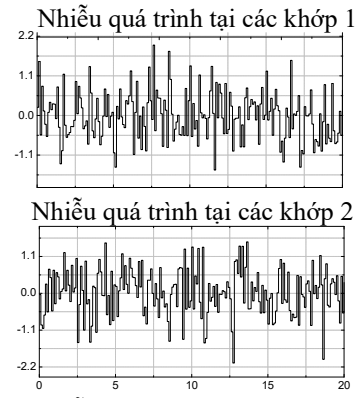
Hình 3 biểu diễn quỹ đạo mong muốn của các khớp. Để đảm bảo tính thực tế, các nhiễu quá trình dưới dạng nhiễu trắng, như Hình 4, được thêm vào tại momen xoắn ngõ ra của các cơ cấu chấp hành.

Giá trị thực của các hệ số khối lượng và ma sát được lựa chọn như sau  $m_1 = 7$ ;  $m_2 = 3.5$ ;  $a_1 = 3$ ;  $m_2 = 10$ .

Để đánh giá tính thích nghi và bền vững của bộ điều khiển đang nghiên cứu này, chúng tôi đã dùng một bộ điều khiển PID cổ điển [2], một bộ điều khiển CTC sử dụng các thông số mô hình hoàn hảo (giá trị thực) (gọi là PCTC [1-2]), một bộ điều khiển CTC với thông số mô hình thực không hoàn hảo nhưng không áp dụng luật thích nghi (16) và (20) (gọi là ICTC), và hai bộ điều khiển CTC sử dụng các hệ số mô hình không hoàn hảo khác nhau nhưng có tính thích nghi (gọi là APIDCTC1 và APIDCTC2) để điều khiển cùng một hệ thống trong những điều kiện làm việc giống nhau. Các hệ số điều khiển được lựa chọn như sau  $K_p = \text{diag}([500; 500])$ ,  $K_v = \text{diag}([21; 21])$  và  $K_i = \text{diag}([800; 800])$  trong khi đó hệ số học được lựa chọn là  $\Gamma = \text{diag}([8; 12; 2; 2])$ . Các giá trị biên và độ dự trữ biên được cài đặt như sau  $l = 0.1I_4$ ,  $h = 50I_4$ , và  $\delta = 0.01$ .

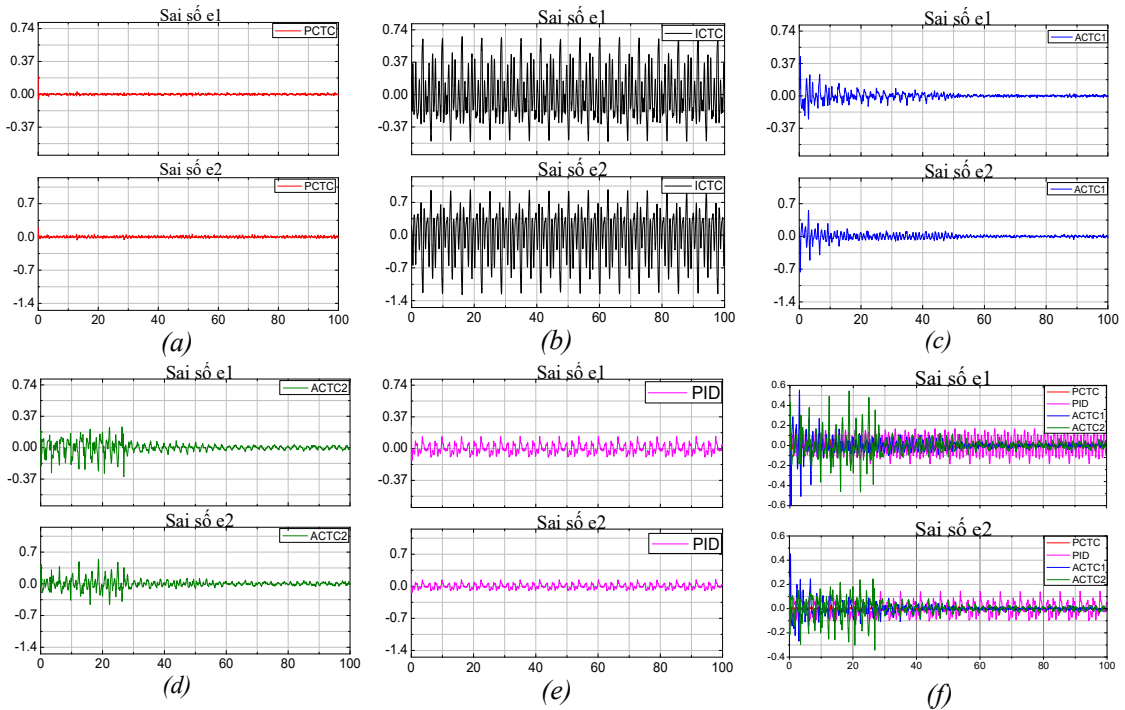


**Hình 3.** Quỹ đạo mong muốn tại các khớp trong thí nghiệm 1

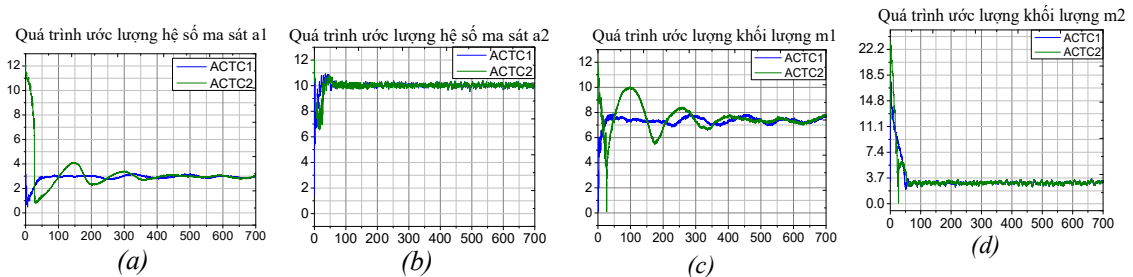


**Hình 4.** Nhiễu quá trình tại các khớp của robot

Kết quả điều khiển so sánh giữa các bộ điều khiển được mô tả trong các Hình 5-6. Kết quả điều khiển của bộ điều khiển CTC lý tưởng (PCTC) được trình bày trong Hình 5 (a). Ở đây chúng ta có thể thấy được rằng nếu chúng ta biết được chính xác các hệ số thực (lý tưởng) của hệ thống thì bộ điều khiển PCTC sẽ cho ra chất lượng điều khiển như mong đợi mặc dù hệ thống đang làm việc trong môi trường nhiễu quá trình lớn. Các chất lượng điều khiển mong muốn (thời gian quá độ và sai số xác lập) có thể được điều chỉnh bằng các hệ số  $K_i$ ,  $K_p$  và  $K_v$ . Trong trường hợp các hệ số điều khiển không biết chính xác được, nếu ta áp dụng bộ điều khiển CTC (trường hợp này được gọi là ICTC – Imperfect Computed Torque Control) mà không được tích hợp đặc tính thích nghi thì chất lượng điều khiển sẽ giảm đi rất đáng kể so với bộ điều khiển PCTC. Sự giảm chất lượng điều khiển này có thể thấy được thông qua phân tích lý thuyết (8)-(10), hoặc các dữ liệu mô phỏng so sánh giữa các Hình 5 (a) và (b). Với việc áp dụng bộ điều khiển CTC cho thông số mô hình không lý tưởng nhưng có sử dụng các luật học (16) và (20), kết quả điều khiển cho các giá trị lựa chọn khác nhau được trình bày trong các Hình 5 (c) và (d). Từ các dữ liệu trong các hình này, trong giai đoạn quá độ khi các thông tin mô hình ban đầu sử dụng để xây dựng tín hiệu điều khiển khác nhau và khác với giá trị thực của nó, thì chất lượng điều khiển quá độ chất lượng điều khiển của các bộ điều khiển thích nghi này dần được cải thiện. Từ việc so sánh các dữ liệu điều khiển trong Hình 5 (f), có thể thấy được, chất lượng điều khiển xác lập của bộ điều khiển CTC lý tưởng (PCTC) và các bộ điều khiển CTC thích nghi (APIDCTC1 và APIDCTC2) đều như nhau mặc dù giai đoạn quá độ có sự khác nhau rõ ràng. Từ đó có thể khẳng định được hiệu quả điều khiển của bộ điều khiển thích nghi này. Một lưu ý nhỏ có thể được nhìn thấy từ dữ liệu trong Hình 5(e) đó là trong trường hợp không xác định được các thông số hệ thống một cách chắc chắn thì bộ điều khiển PID cổ điển là một giải pháp an toàn. Số liệu sai số tuyệt đối lớn cực đại (MA) và trung bình bình phương (RMSE) của 5 phương pháp trong một giai đoạn xác lập được thống kê ở Bảng 1. Kết quả thống kê sai số cho thấy bộ điều khiển PID hoạt động ở mức chấp nhận được đối với những quỹ đạo biến đổi liên tục. Trong khi đó, các dữ liệu thống kê này cũng cho người dùng thấy được nên có một sự cân nhắc nhất định khi áp dụng bộ điều khiển CTC thông thường, vì trong một số trường hợp khi các thông số hệ thống thay đổi hoặc không được xác định chính xác có thể dẫn đến chất lượng điều khiển rất thấp. Tuy nhiên không tốt như mong đợi, tuy nhiên hệ thống kín vẫn ổn định. Nhờ vào đặc tính của học được thiết kế, nhược điểm này có thể được khắc phục với các luật thích nghi phù hợp. Quá trình ước lượng các hệ số khối lượng và ma sát được trình bày trong các Hình 6. Mặc dù xuất phát từ các giá trị khởi tạo khác nhau, nhưng hệ thống thích nghi hoàn toàn có thể đưa giá trị ước lượng này tiến đến gần giá trị thực của hệ thống. Do đó, khả năng học của hệ thống đã được xác nhận một cách chắc chắn thông qua kết quả mô phỏng này.



**Hình 5.** Sai số điều khiển tại các khớp của bộ điều khiển CTC khác nhau trong thí nghiệm 1: a) CTC lý tưởng (PCTC); b) CTC không lý tưởng thụ động (ICTC); c) CTC không lý tưởng thích nghi 1 (APIDCTC1); d) CTC không lý tưởng thích nghi 2 (APIDCTC2); e) PID cổ điển; và f) So sánh giữa PCTC, APIDCTC1, APIDCTC2, và PID



**Hình 6.** Quá trình ước lượng các hệ số mô hình chưa biết của bộ điều khiển thích nghi 1 (APIDCTC1) và thích nghi 2 (APIDCTC2) trong thí nghiệm 1: a) ước lượng hệ số khối lượng  $m_1$ ; b) ước lượng hệ số khối lượng  $m_2$ ; c) ước lượng hệ số ma sát  $a_1$ ; và d) ước lượng hệ số ma sát  $a_2$ .

Khớp	Phương pháp	PID	PCTC	IPCTC	APIDCTC1	APIDCTC2
1	MA	0.1424	0.0217	0.6462	0.02642	0.0262
	RMSE	0.0522	0.0062	0.2674	0.0082	0.0096
2	MA	0.1839	0.0493	1.2415	0.0512	0.0519
	RMSE	0.0926	0.0164	0.4937	0.0157	0.0178

**Bảng 1.** Bảng thống kê sai số điều khiển của các phương pháp điều khiển trong thí nghiệm 1

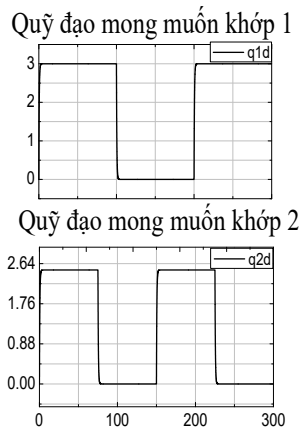
**4.2. Thí nghiệm với quỹ đạo tĩnh**

Trong thí nghiệm này, quỹ đạo mong muốn của các khớp được lựa chọn là các sóng tín hiệu xung vuông tròn như biểu diễn ở Hình 7. Sử dụng các bộ điều khiển trên để điều khiển hệ thống trong trường hợp này, ta được các kết quả điều khiển được biểu diễn như trong các Hình 8-9.

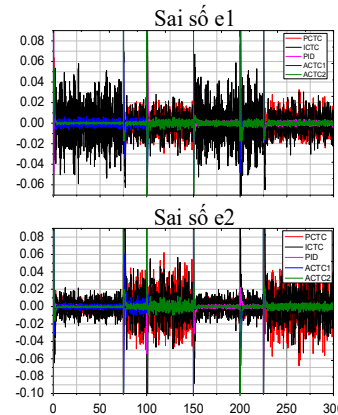
Ở Hình 9, việc sử dụng quỹ đạo mong muốn là xung vuông làm cho quá trình ước lượng thông số của hệ thống chưa được tối ưu do quỹ đạo mong muốn còn đơn điệu vì bản chất quá trình ước lượng cần quỹ đạo có biên độ đa dạng giúp sai số ước lượng hội tụ nhanh hơn. Tuy nhiên điều này không làm ảnh hưởng đến mục tiêu điều khiển chính của hệ thống trong suốt quá trình điều khiển như Hình 8, trong đó chúng ta có thể thấy rằng các dao động được triệt tiêu một cách rất hiệu quả và các sai số điều khiển đều nhanh chóng hội tụ về giá trị không. Đây chính là nét độc đáo tạo nên sự khác biệt của bộ điều khiển này so với các bộ điều khiển khác. Kết quả thống kê sai số xác lập ở Bảng 2 cho thấy bộ điều khiển PID hoạt động tốt hơn ở những quỹ đạo tĩnh.

Khớp	Phương pháp	PID	PCTC	IPCTC	APIDCTC1	APIDCTC2
1	MA	0.0037	0.0325	0.0309	0.0031	0.0039
	RMSE	0.0012	0.0089	0.0100	0.0009	0.0011
2	MA	0.0032	0.0679	0.0531	0.0059	0.007
	RMSE	0.0001	0.0186	0.0176	0.0017	0.0020

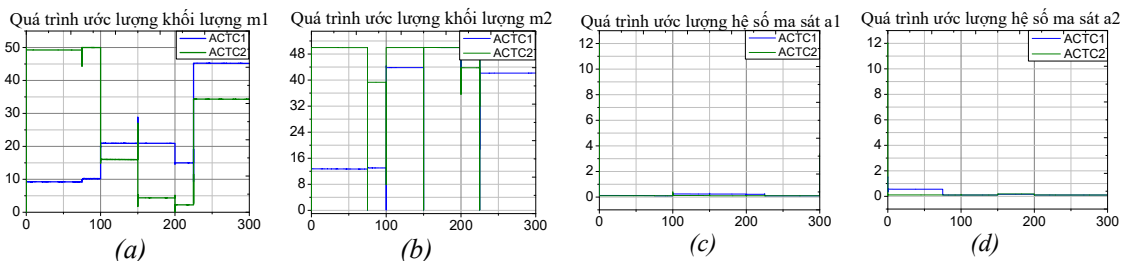
**Bảng 2.** Bảng thống kê sai số điều khiển của các phương pháp điều khiển trong thí nghiệm 2.



**Hình 7.** Quỹ đạo mong muốn tại các khớp trong thí nghiệm 2



**Hình 8.** Tổng hợp sai số điều khiển tại các khớp của các bộ điều khiển PID (PID), CTC lý tưởng (PCTC), CTC không lý tưởng thụ động (ICTC), thích nghi 1 (APIDCTC1) và thích nghi 2 (APIDCTC2) trong thí nghiệm 2



**Hình 9.** Quá trình ước lượng các hệ số mô hình chưa biết của bộ điều khiển thích nghi 1 (APIDCTC1) và thích nghi 2 (APIDCTC2) trong thí nghiệm 2: a) ước lượng hệ số khối lượng  $m_1$ ; b) ước lượng hệ số khối lượng  $m_2$ ; c) ước lượng hệ số ma sát  $a_1$ ; và d) ước lượng hệ số ma sát  $a_2$ .

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một cấu trúc điều khiển PID thích nghi cho các hệ thống tay máy robot phức tạp. Quá trình thích nghi được tích hợp vào tín hiệu điều khiển dựa vào cấu trúc mô hình của robot sử dụng phương pháp khử momen mô hình. Các kết quả thảo luận lý thuyết và mô phỏng kiểm chứng cho thấy hiệu quả làm việc của phương pháp này. Một điểm cần lưu ý là các quỹ đạo mong muốn phải được quy hoạch phù hợp để cung cấp đủ thông tin cần thiết cho quá trình thích nghi. Tuy nhiên, trong phần lớn các quỹ đạo sử dụng trong các robot công nghiệp mang đủ năng lượng để kích thích quá trình học này, và vì vậy bộ điều khiển này hoàn toàn có thể áp dụng để điều khiển trực tuyến hệ thống. Mặt khác, bộ điều khiển này vẫn còn một số hạn chế như phụ thuộc vào cấu trúc mô hình, chất lượng đáp ứng quá độ ban đầu chưa được tối ưu. Phương pháp này cũng có thể mở rộng để điều khiển các hệ thống cơ điện tử khác.

## Acknowledgement

This work belongs to the project grant No: B2021-SPK-03. funded by Ministry of Education and Training, and hosted by Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. A. Llama, R. Kelly, and V. Santibanez, "Stable computed-torque control of robot manipulators via fuzzy self-tuning", *IEEE Trans. Syst., Man, and Cyber., Part B*, vol. 30, no. 1, pp. 143-150, 2020.
- [2] J.J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd Edition, 2005, Pearson Prentice Hall.
- [3] P. Masarati, "Computed torque control of redundant manipulators using general-purpose software in real-time", *Multibody System Dynamics*, vol. 32, pp. 403-428, 2014.
- [4] J.W. Burdick, "An Algorithm for Generation of Efficient Manipulator Dynamic Equations," in *IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, 1986
- [5] R. H. Lathrop, "Parallelism in Manipulator Dynamics", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, Number 2, Summer 1985
- [6] Z. Song, J. Yi, D. Zhao, and X. Li "A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy approach", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 154, no. 2, pp. 208-226, 2005.
- [7] G. Goodwin and K.S. Sin, *Adaptive Filtering, Prediction, and Control*, Prentice Hall, 1984.
- [8] S. Dubowsky and D.T. DesForges, "The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators", *The Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 101, September 1979.
- [9] M. Tomizuka and R. Horowitz, "Model Reference Adaptive Control of Mechanical Manipulators", *IFAC Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, San Francisco, Ca., 1983.
- [10] A.J. Koivo, and T. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-28, No. 2, Feb. 1983.
- [11] S. Nicosia and P. Tomei, "Model Reference Adaptive Control Algorithms for Industrial Robots", *Automatica*, Vol. 20, No. 5, 1984.
- [12] Zhiyu Zhou and Bangyao Wu, "Adaptive sliding mode control of manipulators based on fuzzy random vector function links for friction compensation", *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 227, February 2021.
- [13] Kang Huang, Yuanjie Xian, Shengchao Zhen and Hao Sun, "Robust control design for a planar humanoid robot arm with high strength composite gear and experimental validation", *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 155, 16 June 2021.
- [14] S. Shankar Sastry, "Model-reference adaptive control - Stability, Parameter Convergence, and Robustness", *IMA Journal of Math. Control and Information*, pp. 27-66, 1984.
- [15] B.D.O. Anderson and S. Vongpanitlerd, *Network Synthesis: A State Space Approach*, Prentice Hall, 1973
- [16] Parks, "Liapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-11, No. 3, July, 1966.
- [17] W. Rndin, *Principles of Mathematical Analysis*, McGraw-Hill Book Company, 1976.
- [18] A.P. Morgan and K.S. Narendra, "On the Uniform Asymptotic Stability of Certain Linear Nonautonomous Differential Equations", *SIAM Journal of Control and Optimization*, Vol. 15, 1977.
- [19] B.D.O. Anderson, "Exponential Stability of Linear Equations Arising in Adaptive Identification", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-22, pp. 83-88, 1977.
- [20] O. Klatib, "Dynamic Control of Manipulators in Operational Space", Sixth IFTOMM Congress on Theory of Machines and Mechanisms, New Delhi, December 15-20, 1983.
- [21] J. J. Craig, P. Hsu, and S. s. Sastry, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," Reading, MA: Addison-Wesley, 1988.
- [22] B. Paden and R. Panja, "globally asymptotically stable 'PD+' controller for robot manipulators," *International Journal of control*, vol. 47, no. 06, pp. 1697-1712, 1988.
- [23] D. X. Ba, K. K. Ahn, D. Q. Truong, and H. G. Park, "Integrated model-based backstepping control for an electro-hydraulic system," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 17, no. 5, pp. 1-13, 2016.
- [24] A. K. Bhatia, J. Jiang, Z. Zhen, N. Ahmed, and A. Rohra, "Projection modification based robust adaptive backstepping control for multipurpose quadcopter UAV," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 154121-154130, 2019.
- [25] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust Adaptive Control*, 2012, Courier Corporation.



**Vo Nguyen Thong** received the B.S degree from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2020.

He is currently studying for a M.S degree at the Ho Chi Minh City University of Technology (BKU), Ho Chi Minh City, Vietnam. He is also the member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include computer vision, intelligent control, robotics control and their applications.



**Nguyen Hai Phong** received the B.S degree from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2020.

He is currently studying for a M.S degree at the Ho Chi Minh City University of Technology (BKU), Ho Chi Minh City, Vietnam. He is also the member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include intelligent control, robotics control, modern control theories and their applications.



**Nguyen Dang Hung Phu** received the B.S degree from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2020.

He is currently studying for a M.S degree at the Ho Chi Minh City University of Technology (BKU), Ho Chi Minh City, Vietnam. He is also the member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include intelligent control, robotics control, computer vision and their applications.



**Dang Sy Binh** received the B.S degrees from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2021.

He is currently a software engineer with Department of Engineering Japan Viet Nam, Robert Bosch Engineering and Business Solutions Viet Nam (RBVH). He is also the member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include robotics control, intelligent control, nonlinear control and their applications.



**Dang Xuan Ba** received the B.S and M.S. degrees from the Ho Chi Minh City University of Technology (BKU), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2008 and 2012, and the Ph.D. degree in the School of Mechanical Engineering, University of Ulsan (UoU), Ulsan, Korea, in 2016, respectively.

He is currently a lecturer with the Department of Automatic Control, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam. He is also the manager of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include intelligent control, nonlinear control, modern control theories and their applications.