

# ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI LỰC/VỊ TRÍ CHO ROBOT TAY MÁY SỬ DỤNG MẠNG NƠ - RON BÁN KÍNH CƠ SỞ

FORCE/ POSITION ADAPTIVE CONTROL FOR ROBOT MANIPULATOR USING RADIAL BASIC FUNCTION NEURAL NETWORK

Phan Đình Hiếu<sup>1,\*</sup>, Lê Ngọc Duy<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.250>

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ - ron bán kính cơ sở (RBFNN) để điều khiển lực/vị trí cho cánh tay robot tương tác với môi trường làm việc. So với phương pháp điều khiển trượt truyền thống bộ điều khiển RBFNN có ưu điểm là khả năng học và xấp xỉ các hàm phi tuyến, bất định và không biết trước với độ chính xác tùy ý ngay cả khi các tham số hệ thống luôn thay đổi. Trong khi đó, bộ điều khiển trượt phải bù chính xác hàm phi tuyến vì vậy hiện tượng chattering xảy ra khi hệ thống có nhiễu bất định và các tham số hệ thống thay đổi. Bộ điều khiển thích nghi sử dụng RBFNN sẽ cập nhật trực tuyến trọng số mạng nơ-ron do đó các vec tơ đầu ra mạng nơ - ron được huấn luyện trực tuyến để xấp xỉ các thành phần bất định hệ thống. Bên cạnh đó, luật điều khiển và luật thích nghi được tính toán dựa trên sử dụng hàm Lyapunov. Kết quả mô phỏng lực/vị trí cánh tay robot A465 của CRS robotics sử dụng phần mềm Matlab Simulink đảm bảo lực và vị trí cánh tay robot bám theo giá trị đặt trước với độ chính xác cao.

**Từ khóa:** Mạng nơ - ron bán kính xuyên tâm; điều khiển thích nghi, môi trường làm việc; tham số thay đổi; cánh tay robot.

## ABSTRACT

This paper presents an adaptive control method using radial basic function neural network (RBFNN) to control the force/position of robot manipulators under working environment constraint. Compare to the traditional sliding controller, the RBFNN controller has the advantage of being able to learn and approximate unknown nonlinear functions with arbitrary precision regardless of the various system parameters while the sliding controller need to accurately calculate the nonlinear functions so the chattering occurs under the affect of the uncertain system parameters and disturbance. The adaptive controller using RBFNN will update the online neural network weights so that the output vectors of neural network are trained online to approximate uncertainty components of the system. Besides, the control and adaptive law are calculated base on the use of Lyapunov function. The simulation results of A465 CRS robotics using Matlab Simulink software guarantee the accuracy and reliability of the position/force end - effector robot manipulators.

**Keywords:** RBFNN; adaptive control, working environment; parameter uncertainty; robot manipulators.

<sup>1</sup>Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: phandinhhieucdt@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/10/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 12/12/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Một trong những nhiệm vụ quan trọng đối với robot tay máy đó là điểm tác động cuối của robot di chuyển theo quỹ đạo cho trước. Bên cạnh đó, trong một số ứng dụng của robot tay máy như lắp ráp, mài, hàn..., robot làm việc dưới sự ràng buộc của môi trường, khi đó robot sẽ tác động lực và chịu tác động của phản lực lên điểm tác động cuối cánh tay robot. Chính vì vậy robot không những di chuyển theo quỹ đạo cho trước mà còn duy trì lực tác động lên môi trường làm việc với một lực mong muốn. Để thực hiện được thì cần xây dựng hệ thống điều khiển kết hợp lực/vị trí đảm bảo hệ thống hoạt động chính xác và ổn định. Đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về các phương pháp điều khiển kết hợp lực/vị trí [1-6]. Raiberd và Craid đã xây dựng bộ điều khiển lực/vị trí để điều khiển điểm tác động cuối cánh tay robot sử dụng cảm biến lực. Kwan [2] đã đề xuất và phát triển phương pháp điều khiển trượt thích nghi bền vững để điều khiển lực/vị trí cho cánh tay robot có xét đến động lực học của động cơ. Kouya và nhóm tác giả đã đưa ra phương pháp chỉnh thích nghi tham số cho bộ điều khiển quán chiếu để điều khiển lực và vị trí cánh tay robot [3]. Cheah và nhóm tác giả đề xuất bộ điều khiển lực/vị trí đảm bảo hoạt động tốt mà không cần biết chính xác ma trận Jacobi, động học và động lực học robot [4]. Filaretov Zurev [5] đã thiết kế hệ thống điều khiển lực vị trí tay máy robot không xét đến cảm biến lực. Để điều khiển lực vị trí, Roy and Whitcomb [6] đã thiết kế bộ điều khiển thích nghi cho tay máy robot tiếp xúc với bề mặt môi trường tuyến tính chưa được xác định.

Gần đây, mạng nơ ron đang được tập trung phát triển và ứng dụng cho rất nhiều các lĩnh vực như mô hình hoá, xử lý tín hiệu, nhận dạng mẫu, đặc biệt là ứng dụng trong các hệ thống điều khiển. Một trong những ưu điểm của các mạng nơ ron là khả năng học và xấp xỉ các hàm phi tuyến với độ chính xác tùy ý. Việc ứng dụng mạng nơ ron cho các mục đích điều khiển đang thu hút được sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học. Mạng nơ ron kết hợp với các phương pháp điều khiển được xem như là một giải pháp hiệu quả để giải quyết bài toán điều khiển cho các đối tượng có mô hình bất định và chịu ảnh hưởng của nhiễu tác động. Có nhiều nghiên cứu về mạng nơ ron áp dụng vào trong hệ

thống điều khiển. Park và Sandberg đã đề xuất mạng RBF có hàm kích hoạt lớp ẩn là hàm Gauss thay cho hàm kích hoạt lớp ẩn là hàm sigmod [7]. Fanaei và Farrrokhi [8] đã thiết kế bộ điều khiển mờ để bù lực ma sát sinh ra do tiếp xúc điểm tác động cuối với bề mặt tiếp xúc. Bechliouslis và nhóm tác giả [8] đã xây dựng bộ điều khiển thích nghi lực và vị trí sử dụng mạng Nơ ron cho hệ thống bất định. Kumar và nhóm tác giả đề xuất phương pháp điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ ron truyền thẳng để điều khiển lại lực vị trí cho robot tay máy [9]. Liu và nhóm tác giả [10] đã xây dựng sử dụng mạng nơ ron RBF kết hợp với bộ điều khiển PID để khắc phục sai lệch động lực học robot tay máy. Hà Thị Kim Duyên và nhóm tác giả [11] đã xây dựng bộ điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ ron RBF để ước lượng hàm phi tuyến, điều khiển robot Omni 4 bánh đa hướng. Mạng nơ ron RBF cũng được kết hợp với bộ điều khiển trượt đầu cuối để ước lượng thành phần phi tuyến, lỗi và không đảm bảo về cấu trúc [12].

Trong bài báo này mạng nơ ron bán kính cơ sở (RBFNN) được sử dụng để xấp xỉ thành phần phi tuyến, bất định và không biết trước của robot tay máy ba bậc tự do khi robot tác động lực lên môi trường làm việc. Các trọng số đầu ra của mạng nơ ron và tham số của bộ điều khiển lai lực/vị trí được xác định khi phân tích tính ổn định hệ thống sử dụng hàm Lyapunov. Bộ điều khiển lai lực/vị trí chứa thành phần đầu ra mạng RBFNN sẽ bù tính phi tuyến, bất định của robot đảm bảo robot hoạt động ổn định bền vững và bám chính xác cao vị trí và lực điểm tác động cuối cánh tay robot khi robot tương tác với môi trường làm việc.

## 2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

### 2.1. Động lực học cánh tay robot

Phương trình động lực học cánh tay robot có lực tương tác với môi trường làm việc được mô tả như sau [13, 14]:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + g(q) = \tau + J_\phi^T(q)\lambda \tag{1}$$

Trong đó,  $q \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ góc quay xét trong không gian khớp,  $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ vận tốc góc,  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ gia tốc góc khớp,  $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là ma trận thành phần quán tính,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ thành phần hướng tâm và coriolis,  $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là ma trận đường chéo xác định dương và là đại lượng biểu thị cho hệ số ma sát nhớt,  $g(q) \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ của lực trọng trường,  $\tau \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ của mô men đầu vào đặt tại các khớp,  $\lambda \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ nhân tử Lagrange (là đại lượng vật lý biểu thị cho lực tác động của điểm tác động cuối cánh tay robot lên môi trường),  $J_\phi(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là ký hiệu gradient của ràng buộc holonomic. Giả sử đưa ra một cặp giá trị, bao gồm quỹ đạo đặt (mong muốn) của vị trí  $q_d(t)$  trong không gian khớp và quỹ đạo đặt của lực  $\lambda_d(t)$  trên bề mặt của môi trường;  $J_\phi^T(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là ký hiệu gradient của ràng buộc holonomic và được mô tả bằng phương trình sau:

$$\phi(q) = 0 \tag{2}$$

Vế trái của phương trình (1) có thể được viết lại như sau:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})p \tag{3}$$

Trong đó  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \dots & Y_{1,15} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \dots & Y_{2,15} \\ Y_{3,1} & Y_{3,2} & \dots & Y_{3,15} \end{bmatrix}$  là ma trận hồi

quy hoàn toàn không phụ thuộc vào các tham số động lực học của các khớp của cánh tay robot như khối lượng và các thành phần quán tính.  $p = [p_1, p_2, \dots, p_{15}]^T$  là véc tơ mà có các thành phần là các hàm của các tham số không được biết hoặc không chắc chắn hoặc có thể thay đổi trong quá trình làm việc của mô hình động lực học cánh tay robot. Véc tơ tham số  $p$  này phụ thuộc vào kết cấu cơ khí, bao gồm chiều dài, khối lượng các thanh nối và phụ thuộc vào các mô men quán tính sinh ra khi cánh tay robot làm việc. Như vậy, véc tơ tham số này sẽ có sự thay đổi khi cánh tay robot làm việc tại các vị trí khác nhau. Một yếu tố ảnh hưởng đến sự thay đổi của véc tơ tham số  $p$  là sự thay đổi của tải trọng mà cánh tay robot mang theo. Từ phương trình (1), (3). Phương trình động lực học robot được viết lại như sau:

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau + J_\phi^T(q)\lambda \tag{4}$$

### 2.2. Điều khiển lực/vị trí cánh tay robot

Giả sử đưa ra một tập giá trị, bao gồm quỹ đạo đặt (mong muốn) của vị trí  $q_d(t)$  trong không gian khớp và quỹ đạo đặt của lực  $\lambda_d(t)$  trên bề mặt của môi trường đưa ra. Mục tiêu là thiết kế bộ điều khiển vị trí/ lực để tạo ra mô men  $\tau$  đặt vào các khớp của cánh tay robot đủ để đưa quỹ đạo các khớp bám tiệm cận với quỹ đạo đặt  $q_d(t)$  đồng thời điểm tác động cuối cánh tay robot tác động vào bề mặt môi trường một lực bám tiệm cận với lực mong muốn  $\lambda_d(t)$  khi  $t \rightarrow \infty$ . Gọi  $\dot{q}_r$  là giá trị tham chiếu danh định của véc tơ vận tốc  $\dot{q}$  được định nghĩa như sau:

$$\dot{q}_r = Q(q)(\dot{q}_d - Le) + \eta J_\phi^T(q)\Delta F \tag{5}$$

Trong đó,  $L$  là ma trận đường chéo xác định dương,  $\eta$  là hằng số dương. Véc tơ  $\dot{q}_r$  được phân tích trong hai không gian trực giao với nhau dựa trên hai ma trận chiếu là  $Q(q)$  và  $P(q)$ . Các sai lệch vị trí, vận tốc và lực được xác định:

$$e = q - q_d; \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d; \Delta \lambda = \Delta \dot{F} = \lambda - \lambda_d$$

Nếu ta gọi sai lệch giữa đáp ứng của vận tốc  $\dot{q}$  và giá trị tham chiếu danh định của vận tốc  $\dot{q}_r$  là  $s = \dot{q} - \dot{q}_r$ , ta có:

$$s = s_t + s_n = Q(q)(\dot{q}_d - Le) + \eta J_\phi^T(q)\Delta F \tag{6}$$

Nhóm tác giả sẽ thiết kế và đánh giá hai bộ điều khiển đó là bộ điều khiển trượt lực vị trí trong [14] và bộ điều khiển thích nghi sử dụng mạng RBFNN để thấy được tính ưu việt của phương pháp điều khiển mà nhóm tác giả đề xuất.

#### 2.2.1. Bộ điều khiển trượt lực/vị trí

Để thiết kế bộ điều khiển trượt vị trí/lực cánh tay robot thì vận tốc các khớp  $\dot{q}$  và gia tốc các khớp  $\ddot{q}$  lần lượt được

thay thế bằng giá trị danh định vận tốc và gia tốc góc  $\dot{q}_i, \ddot{q}_i$ . Phương trình (3) được viết lại dưới dạng sau:

$$H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + D\dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_i) p \quad (7)$$

Bộ điều khiển trượt lực/vị trí được thiết kế theo luật như sau [14]:

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_i) p_0 - k \operatorname{sgn}(s) - J_\phi^T(q)(\lambda_d - \mu \Delta F) \quad (8)$$

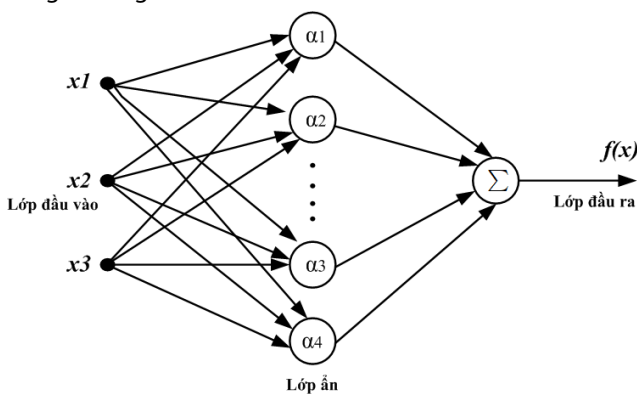
$p_0$  là tham số ban đầu hệ thống khi chưa biến đổi, hệ số khếch đại bộ điều khiển trượt  $k$  được xác định tiêu chuẩn ổn định Lyapunov đã được chứng minh trong [14].

$$k_i = \sum_{j=0}^{20} Y_{ij}(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_i) \bar{p}_j \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

Tuy nhiên, hệ số khếch đại bộ điều khiển trượt  $k$  theo phương trình (9) tương đối lớn do tham số hệ thống chứa các thành phần bất định  $p_j$  biến đổi rộng vì vậy hiện tượng chattering đầu ra bộ điều khiển  $\tau$  lớn sẽ ảnh hưởng tới chất lượng hệ thống. Để khắc phục vấn đề này, bộ điều khiển thích nghi sử dụng mạng RBF để xấp xỉ các thành phần phi tuyến, bất định và chưa biết trước của cánh tay robot khi robot tác động lên môi trường bên ngoài.

**2.2.2. Bộ điều khiển lực/vị trí RBFNN**

Nhiều nghiên cứu đã phân tích và đánh giá về việc sử dụng mạng nơ ron bán kính cơ sở cho các hệ thống điều khiển phi tuyến bất định. Trong bài báo, Robot A465 được điều khiển là một hệ thống phi tuyến và chứa nhiều thành phần bất định. Mạng nơ ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm số chứa các thành phần bất định và phi tuyến của robot. Ưu điểm cơ bản của mạng này là các nơ ron RBF là các hàm trơn, khả vi do vậy đảm bảo tốc độ hội tụ nhanh và các trọng số của mạng nơ ron RBF được xác định qua luật thích nghi đảm bảo tính ổn định của hệ thống. Do đó đối với mạng RBF sẽ luôn đảm bảo hệ thống ổn định, bền vững đáp ứng nhanh và giảm hiện tượng chattering so với bộ điều khiển trượt thông thường.



Hình 1. Mạng nơ ron bán kính cơ sở

Trên hình 1 là cấu trúc mạng bán kính cơ sở RBF gồm 3 lớp: lớp đầu vào, lớp ẩn, và lớp đầu ra. Các nhân nơ ron ở lớp ẩn được tính bằng hàm phi tuyến bán kính cơ sở. Lớp ẩn chứa một chuỗi các đơn vị tính toán được gọi là các nhân nơ ron ẩn. Mỗi nhân lại chứa một véc tơ là thông số tâm của nhân nơ ron và nó có cùng chiều với giá trị véc tơ đầu vào.

Véc tơ đầu vào được chọn là  $x = [e, \dot{e}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \Delta\lambda]^T$ . Hàm bán kính cơ sở được sử dụng để tính toán đầu ra của các nhân lớp ẩn của mạng nơ ron. Đầu ra lớp ẩn được tính toán theo công thức:

$$\alpha_i = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{\delta_i^2}\right) \quad (10)$$

Đầu ra của mạng RBFNN được tính theo công thức:

$$f(x) = W^T \alpha(x) \quad (11)$$

Trong đó:  $W^T = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{31} & w_{32} & \dots & w_{3n} \end{bmatrix}$  là ma trận trọng số

đầu ra mạng nơ ron với 3 đầu ra và  $n$  nhân ẩn.

Từ phương trình (6), ta có:

$$\begin{aligned} H\dot{s} &= H\ddot{q} - H\ddot{q}_r = \tau + J_\phi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})\dot{q}_r - D\dot{q} - g(q) - H\ddot{q}_r \\ &= \tau + J_\phi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})(\dot{q}_r + s) - D\dot{q} - g(q) - H\ddot{q}_r \\ &= \tau + J_\phi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})\dot{q}_r - C(q, \dot{q})s - D\dot{q} - g(q) - H\ddot{q}_r \end{aligned}$$

Đặt  $f(x) = C(q, \dot{q})\dot{q}_r + D\dot{q} + g(q) + H\ddot{q}_r$ . Ta có:

$$H\dot{s} = \tau + J_\phi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})s - f(x) \quad (12)$$

$f(x)$  là hàm phi tuyến, bất định được xấp xỉ với đầu ra mạng nơ ron theo công thức sau:

$$f(x) = W^T \alpha(x) + \varepsilon \quad (13)$$

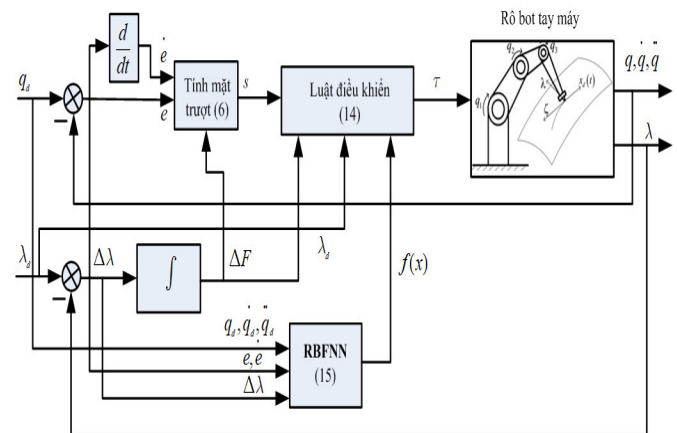
Luật điều khiển:

$$\tau = \hat{f}(x) - k_v s - J_\phi^T(q)(\lambda_d - \mu \Delta F) + v \quad (14)$$

$\hat{f}(x)$  là đầu ra của mạng RBFNN được xác định theo công thức (11).

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \alpha(x) \quad (15)$$

Cấu trúc hệ thống điều khiển lực/vị trí cánh tay robot sử dụng RBFNN được thể hiện dưới hình 2.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển lực/vị trí RBFNN

**2.2.3. Phân tích tính ổn định của hệ thống**

Hàm Lyapunov được lựa chọn:

$$V = \frac{1}{2}s^T Hs + \frac{1}{2}\eta\Delta F^2 + \frac{1}{2}\text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \tilde{W}) \tag{16}$$

Đạo hàm phương trình (16), ta có:

$$\dot{V} = s^T \dot{H}s + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + \eta\Delta F\dot{\Delta F} - \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \dot{\tilde{W}})$$

Trong đó:  $\dot{\tilde{W}} = \dot{W} - \hat{W}$  và  $\dot{W} = 0$

Từ phương trình (12), (13), (14), (5). Ta có:

$$H\dot{s} = \tau + J_\varphi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})s - f(x)$$

$$\begin{aligned} H\dot{s} &= \hat{f}(x) - k_v s - J_\varphi^T(q)(\lambda_d - \mu\Delta F) + v \\ &\quad + J_\varphi^T(q)\lambda - C(q, \dot{q})s - f(x) \\ &= \hat{W}^T \alpha(x) - k_v s - J_\varphi^T(q)(\lambda_d - \mu\Delta F) + v + J_\varphi^T(q)\lambda \\ &\quad - C(q, \dot{q})s - W^T \alpha(x) - \varepsilon \\ &= \tilde{W}^T \alpha(x) - \varepsilon - (k_v + C(q, \dot{q}))s \\ &\quad + J_\varphi^T(q)(\Delta\lambda + \mu\Delta F) + v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T(\tilde{W}^T \alpha(x) - \varepsilon - (k_v + C(q, \dot{q}))s + J_\varphi^T(q)(\Delta\lambda + \mu\Delta F) + v) \\ &\quad + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + \eta\Delta F\dot{\Delta F} - \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \dot{\tilde{W}}) \end{aligned}$$

Mặt khác ta có:

$$\begin{aligned} s^T J_\varphi^T(q) &= (J_\varphi(q)s)^T = (J_\varphi(q)(s_t + s_n))^T = (J_\varphi(q)s_n)^T \\ &= (-J_\varphi(q)\eta J_\varphi^T(q)\Delta F)^T = -\eta\Delta F \end{aligned}$$

$$\Delta\dot{F} = \Delta\lambda; \quad \dot{H} - 2C = 0$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{V} &= -s^T k_v s - \mu\eta\Delta F^2 + s^T v - s^T \varepsilon + s^T \tilde{W}^T \alpha(x) - \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma \dot{\tilde{W}}) \\ &= -s^T k_v s - \mu\eta\Delta F^2 + s^T v - s^T \varepsilon + \tilde{W}^T (s^T \alpha(x) - \Gamma \dot{\tilde{W}}) \end{aligned}$$

Với luật thích nghi được chọn:  $\dot{\hat{W}} = \frac{1}{\Gamma} s^T \alpha(x)$  thì

$$\dot{V} = -s^T k_v s - \mu\eta\Delta F^2 + s^T v - s^T \varepsilon$$

Ta chọn:  $v = -\varepsilon_N \text{sgn}(s)$  và  $\|\varepsilon\| < \varepsilon_N$

$$\Rightarrow \dot{V} = -s^T k_v s - \mu\eta\Delta F^2 - |s|^T \varepsilon_N - s^T \varepsilon < 0$$

Vậy hệ thống ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

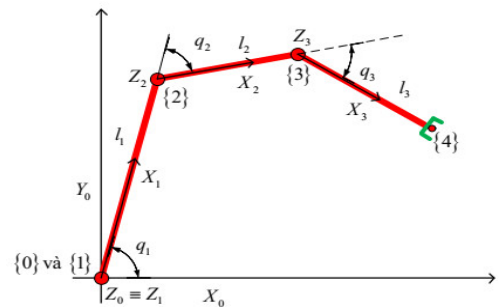
**3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG**

Robot tay máy A465 được mô tả hình học như trong hình 3. Trong đó {0}, ..., {4} là các hệ tọa độ được gắn với đế, khớp 1, khớp 2, khớp 3 và điểm tác động cuối gắn với tay máy robot. Trong quá trình mô phỏng, bộ điều khiển sẽ thực hiện điều khiển điểm tác động cuối di chuyển trên đoạn thẳng dài  $d_1 = 0,4m$ . Các kết quả tính toán cụ thể về phương trình động học, ma trận Jacobi, ma trận hồi quy, phương trình động lực học được mô tả trong phụ lục tài liệu [15]. Mặt phẳng nghiêng được mô tả bởi phương trình:

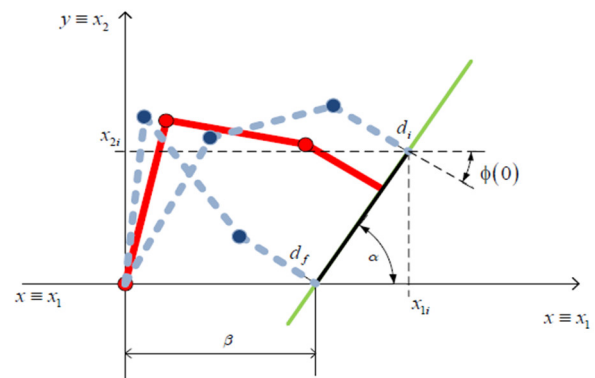
$$\varphi(x) = \cos(\alpha)y - \sin(\alpha)(x - \beta) = 0 \tag{17}$$

Trong đó  $\alpha = 68^\circ$  là góc nghiêng của mặt phẳng,  $\beta = 0,35m$  là khoảng cách giữa mặt phẳng và trục thẳng đứng. Quỹ đạo mong muốn được thiết kế theo đa thức nội suy bậc 5 [15]. Robot di chuyển và tì vào mặt phẳng nghiêng phải đảm bảo sao cho điểm tác động cuối cánh tay robot có hướng vuông góc với mặt phẳng nghiêng mô tả trên hình 4. Lực mong muốn cần đạt được:

$$\lambda_d = \begin{cases} 12 + 50(1 - e^{-t/2}) + 15\sin(\frac{3\pi t}{2}), & 0 \leq t \leq 6(s) \\ 62(N) & t > 6(s) \end{cases} \tag{18}$$



Hình 3. Mô tả hình học tay máy robot



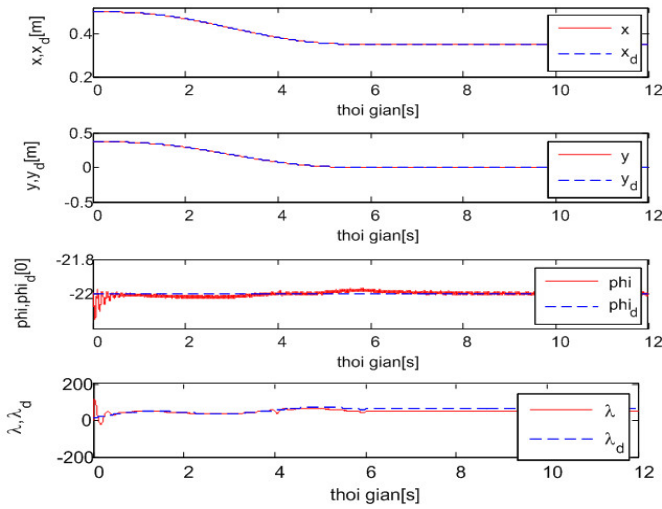
Hình 4. Chuyển động của điểm tác động cuối

Để đánh giá được khả năng đáp ứng của bộ điều khiển với sự thay đổi các tham số động lực học và tải trọng của cánh tay robot ta thực hiện thay đổi tham số p với sự thay đổi được cộng thêm 20% so với giá trị ban đầu. Mạng RBFNN có đầu vào là  $x = [e, \dot{e}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \Delta\lambda]^T$  tương ứng 3 khớp quay của robot, số nút ẩn là  $n = 10$ , đầu ra mạng RBFNN là 3 hàm phi tuyến bất định cho 3 khớp quay. Các tham số mạng nơ ron và bộ điều khiển là:  $\delta_i = 0,5$ . Ma trận

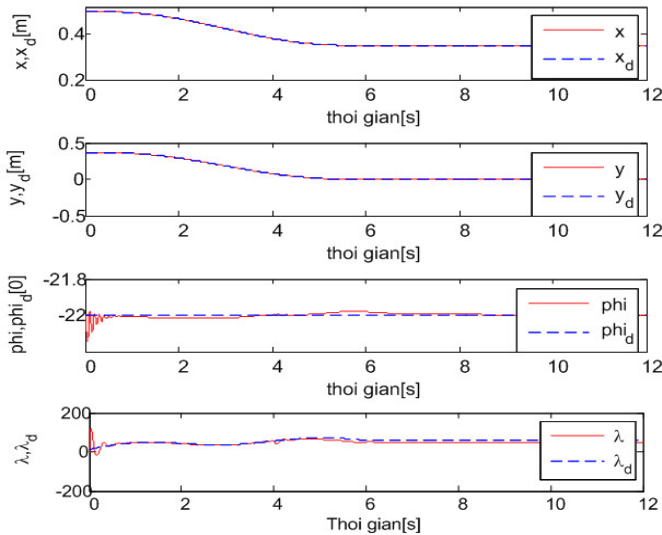
$$c_i(5 \times 10) = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,1 & \dots & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & \dots & 0,1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,1 & 0,1 & \dots & 0,1 \end{bmatrix}; \Gamma = 0,05; \varepsilon_N = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 \end{bmatrix};$$

$$k_v = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

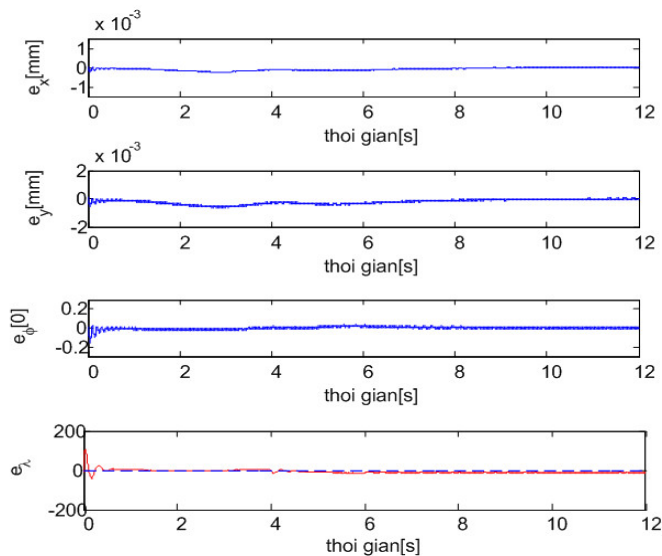
Kết quả mô phỏng được mô tả và so sánh với phương pháp điều khiển trượt truyền thống được thiết kế trong [14].



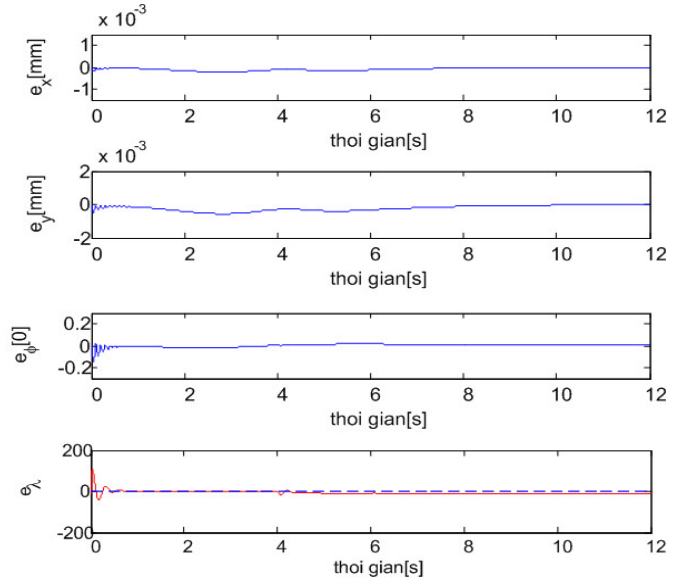
Hình 5. Tọa độ điểm tác động cuối và lực sử dụng điều khiển trượt



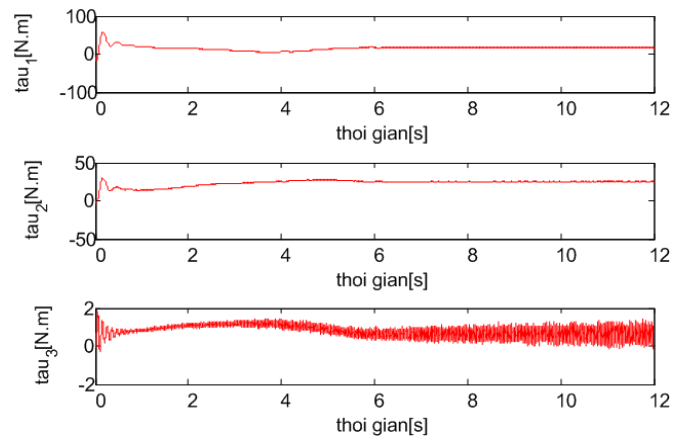
Hình 6. Tọa độ điểm tác động cuối và lực sử dụng bộ điều khiển RBFNN



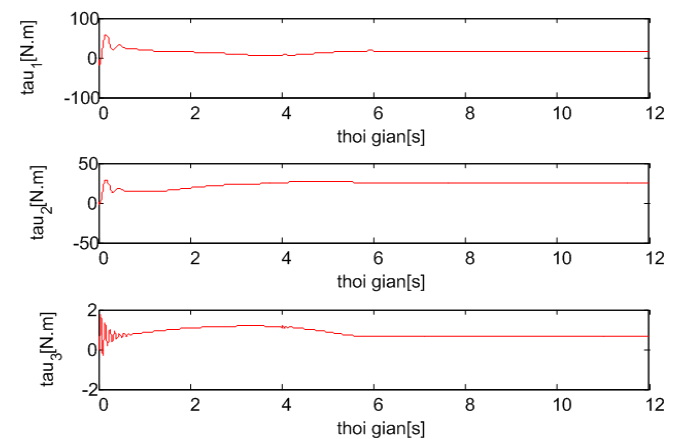
Hình 7. Sai lệch tọa độ điểm tác động cuối và lực sử dụng điều khiển trượt



Hình 8. Sai lệch tọa độ điểm tác động cuối và lực sử dụng điều khiển RBFNN



Hình 9. Tín hiệu điều khiển sử dụng điều khiển trượt



Hình 10. Tín hiệu điều khiển sử dụng điều khiển RBFNN

Kết quả mô phỏng trên hình 5 và hình 6 cho thấy các giá trị thực về vị trí  $[x, y, \theta]$  và lực tương tác  $\lambda$  tại điểm tác động cuối lên bề mặt môi trường luôn bám theo giá trị đặt bất kể tham số động lực học thay đổi. Các kết quả ở hình 6 sử dụng bộ điều khiển RBFNN cho thấy góc  $\theta$  không bị giao động nhiều như góc  $\theta$  ở hình 5 khi sử dụng bộ điều khiển trượt. Hình 7 và 8 mô tả sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị thực về vị

trí và lực sử dụng bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển RBFNN. Kết quả cho thấy sai lệch về vị trí và lực của cả hai bộ điều khiển đều bé, tuy nhiên bộ điều khiển RBFNN tác động có các sai lệch giao động với biên độ bé hơn so với tín hiệu điều khiển trượt. Bảng 1 cũng cho thấy kết quả cụ thể sai lệch về vị trí và lực, kết quả cho thấy sai lệch đối với bộ điều khiển sử dụng RBFNN bé hơn so với bộ điều khiển trượt.

Bảng 1. So sánh sai lệch về vị trí và lực

Bộ điều khiển	Sai lệch vị trí x (m)	Sai lệch vị trí y (m)	Sai lệch vị góc $\Phi$ (độ)	Sai lệch lực $\lambda$
Điều khiển trượt	0,0004	0,0003	0,05	0,8
Điều khiển RBFNN	0,0003	0,0002	0,02	0,6

Hình 9 và 10 mô tả mô men tác động vào các khớp của robot khi sử dụng bộ điều khiển trượt và sử dụng bộ điều khiển RBFNN. Hình 9 và 10 cho thấy hiện tượng chattering rất lớn đối với bộ điều khiển trượt so với hiện tượng chattering bộ điều khiển RBFNN. Qua đó cho thấy bộ điều khiển RBFNN đã làm giảm nhiều hiện tượng chattering tín hiệu điều khiển và giúp cho hệ thống giảm biên độ giao động của vị trí và lực điểm tác động cuối của cánh tay robot khi robot tương tác với môi trường làm việc.

**4. KẾT LUẬN**

Bài báo đã đề xuất bộ điều khiển thích nghi vị trí/lực sử dụng mạng RBFNN để xấp xỉ các thành phần phi tuyến, biến đổi và không biết trước. Tham số bộ điều khiển và trọng số mạng RBFNN được xác định thông qua phân tích đánh giá tính ổn định hàm Lyapunov. Qua kết quả mô phỏng kiểm chứng cho thấy bộ điều khiển thích nghi sử dụng mạng RBFNN đảm bảo vị trí và lực bám theo giá trị cho trước trong điều kiện làm việc mà có sự thay đổi của các tham số động lực học hoặc tải trọng. So với sử dụng bộ điều khiển trượt truyền thống, bộ điều khiển đề xuất không những đảm bảo tính bền vững, ổn định và còn giảm hiện tượng chattering và biên độ giao động của vị trí và lực so với bộ điều khiển trượt thông thường.

[6]. Roy J., L.L. Whitcomb, 2002. *Adaptive force control of position/velocity controlled robots: theory and experiment*. IEEE Trans Robot Autom, 18(2), 121–137.

[7]. Park J., Sandberg, 1991. *Universal Approximation Using Radial-Basis-Function networks*. Neural and Computation 3, 245-257.

[8]. Bechlioulis C.P., et al., 2010. *Neuroadaptive force/position control with prescribed performance and guaranteed contact maintenance*. IEEE Trans Neural Network, 21(12),1857– 1868.

[9]. Kumar N., et al., 2011. *Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators*. Int J Precis Eng Manuf, 12(3),419–426.

[10]. Liu Q., et al., 2021. *Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators*. Neuro Computing, 447(3),213–223.

[11]. Ha T.K.D., et al., 2021. *Adaptive Control for Uncertain Model of Omni-directional Mobile Robot Based on Radial Basis Function Neural Network*. International Journal of Control, Automation and Systems, 19(4), 1715-1727.

[12]. Ruchika, N. Kumar, 2022. *RBF Neural Network-Based Terminal Sliding Mode Control for Robot Manipulators*. Soft computing: Theories and applications,1380(3), 547–557.

[13]. Dao M.T., Phan D.H., 2019. *Adaptive Position/Force Control for Robot Manipulators Using Force and Velocity Observer*. Journal of Electrical Engineering & Technology, 14(6), 2575 - 2582.

[14]. Phan Dinh Hieu, et al., 2019. *Design of sliding position/force controller for robot manipulator under working environment*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, Vol. 55.

[15]. Dao Minh Tuan, 2019. *force of a robot hand using a velocity/force observer*. Doctoral Thesis, Academy of Military Science and Technology, Vietnam.

**AUTHORS INFORMATION**

**Phan Dinh Hieu, Le Ngoc Duy**

School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Raibert M.H., J.J. Craig, 1981. *Hybrid position/force control of manipulators*. ASME J Dyn Syst Meas Control, 103, 126–133.

[2]. Kwan C.M., 1996. *Robust adaptive force/motion control of constrained robots*. IEEE Proc Control Theory Appl, 143(1), 103–109.

[3]. Kouya D.N., et al., 2002. *Backstepping adaptive hybrid force/position control for robotic manipulators*. In: Proceedings of the American control conference, 4595–4600.

[4]. Cheah C.C., et al., 2006. *Adaptive Jacobian motion and force control for constrained robots with uncertainties*. In: Proceedings of the international conference on robotics and automation, 2226–2231.

[5]. Filaretov V.F., A.V. Zuev, 2008. *Adaptive force/position control of robot manipulators*. In: Proceedings of the 2008 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, 96–101.