

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TAY MÁY ĐÔI PHỐI HỢP DI CHUYỂN CÙNG MỘT ĐỐI TƯỢNG RẮN CHUNG TRONG MIỀN THỜI GIAN THỰC SỬ DỤNG CARD DSPACE1103

A CONTROLLER FOR COOPERATIVE DUAL-ARM MANIPULATOR SYSTEM MANIPULATING A SINGLE RIGID OBJECT IN REAL TIME USING CARD DSPACE1103

Luu Thi Hué*

Trường Đại học Điện Lực, Hà Nội, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: huelth@epu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 04/01/2023; Sửa bài / Revised: 23/2/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 01/3/2023)

Tóm tắt - Thực nghiệm cho hệ thống tay máy đôi luôn là vấn đề cần được quan tâm bên cạnh việc phát triển các thuật toán cho hệ thống này. Bài báo giải quyết vấn đề thực nghiệm cho điều khiển hỗn hợp lực, vị trí cho hệ thống tay máy đôi phối hợp giữ ổn định và di chuyển một đối tượng rắn chung theo quỹ đạo mong muốn. Đầu tiên, động lực học của hệ thống gồm tay máy đôi – đối tượng được xây dựng dựa trên nguyên lý Eule-Lagrangian. Dựa trên động lực học đã được xây dựng, bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí được đề xuất để giữ ổn định và di chuyển đối tượng theo quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển được chứng minh ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov. Tiếp theo, một hệ thống thực nghiệm được xây dựng nhằm thử nghiệm thuật toán đề xuất cho hệ tay máy đôi- đối tượng. Cuối cùng, các kịch bản mô phỏng trên phần mềm Matlab/ Simulink và thực nghiệm được thực hiện. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã xác thực tính chính xác, khả thi, hiệu quả của bộ điều khiển.

Từ khóa - Tay máy đôi; tay máy đôi – đối tượng; thuật toán hỗn hợp lực/vị trí; thực nghiệm cho hệ tay máy đôi

1. Giới thiệu

Robot tay máy đôi là robot có hai tay máy giống như hai tay của con người, việc sử dụng hai tay máy phối hợp làm việc sẽ hiệu quả, linh hoạt và làm được nhiều việc hơn so với sử dụng robot đơn. Robot tay máy đôi có thể đảm đương hầu hết các công việc mà con người thực hiện. Nhờ đó, chúng có thể được sử dụng để thay thế cho con người khi làm việc trong các môi trường độc hại nguy hiểm như nhà máy điện hạt nhân, cứu hỏa... Qua khảo sát cho thấy, có một số phương pháp điều khiển điển hình như bộ điều khiển PID, PD, điều khiển trở kháng, điều khiển lai lực/vị trí cho hệ tay máy đôi phối hợp chuyển động được sử dụng rộng rãi vì dễ thực hiện trong thực tế. Bộ điều khiển phối hợp cho robot hai tay được thiết kế trên cơ sở phân tích động học của hệ thống. Chuyển động phối hợp của tay máy đôi dưới bộ điều khiển bù trọng lực PD dựa trên động học nghịch đảo đã được thực hiện [1]. Một cách khác, các thao tác phối hợp giữa hai tay máy bằng cách điều khiển chuyển động ở cấp độ gia tốc được trình bày [2]. Vận tốc/gia tốc tham chiếu của đối tượng được thiết kế theo nhiệm vụ yêu cầu. Với phương pháp điều khiển trở kháng sẽ kết hợp với các phương pháp điều khiển khác để tăng hiệu quả của bộ điều khiển. Bộ điều khiển trở kháng cho tay máy đôi được thiết kế bằng cách sử dụng mối quan hệ Jacobian [3]. Bộ

Abstract - Experimentation for the dual-arm manipulator system is always an attention problem besides developing algorithms for this system. The paper solves the experiment problem of the hybrid force/ position controller in the dual-arm manipulator system to hold stably and move a commonly rigid object with the desired trajectory tracking. First, the dynamics of the dual-arm robot-object system is instituted according to the Eule-Lagrangian principle. A hybrid force/position controller based on the dynamics of the system is proposed to hold stably and move the object desired trajectory tracking. The closed-loop controller is proven to be stable according to Lyapunov stability theory. Next, an experiment system is designed to test the proposed algorithm for the dual-arm robot-object system. Finally, simulation scenarios work on the Matlab/Simulink software, and experiments are performed. Simulation and experiment results have confirmed the accuracy, feasibility, and efficiency controller.

Key words - Dual-arm manipulator; dual-arm manipulator – object; hybrid force/position algorithm; experiment for the dual-arm manipulator system

điều khiển trở kháng được đề xuất sẽ đơn giản và trực quan hơn khi điều chỉnh trở kháng mong muốn và quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển trở kháng kép với hai vòng trở kháng được nghiên cứu trong [4], với trở kháng vòng ngoài giữa đối tượng và môi trường, trở kháng vòng trong giữa bộ điều khiển và đối tượng. Bộ điều khiển này có khả năng theo dõi tốt về vị trí, trở kháng và lực. Các nghiên cứu khác tập trung vào điều khiển kết hợp lực/vị trí cho phối hợp tay máy đôi [5], [6]. Trong [5], kết hợp bộ điều khiển chính/phụ sử dụng cảm biến lực ở khâu tác động cuối, để phối hợp điều khiển đối tượng theo quỹ đạo mong muốn và tránh đối tượng trôi và rơi. Bộ điều khiển [6] giám sát lực mong muốn và bù cho độ lệch quỹ đạo không xác định do nhiễu bên ngoài. Một số công trình khác về điều khiển cho robot tay máy đôi tập trung vào các ứng dụng công nghiệp hơn là đi cải tiến các thuật toán lý thuyết điều khiển phức tạp, điển hình là với nền tảng bộ PID công nghiệp, D.Kruse và cộng sự đã giới thiệu điều khiển dẫn hướng chuyển động, điều khiển lực theo chuỗi tuần tự, bù tải và tránh va chạm [7]. Hay như trong [8] các thí nghiệm đưa ra để đánh giá hiệu suất làm việc của robot tay máy đôi công nghiệp.

Như vậy có thể thấy, vấn đề thực nghiệm cho robot tay máy đôi luôn được quan tâm song song với việc phát triển

¹ Electric Power University, Hanoi, Vietnam (Luu Thi Hue)

các thuật toán cho hệ này. Trong bài báo này tác giả đưa ra phương pháp thực nghiệm cho hệ thống tay máy đôi với những đóng góp như sau:

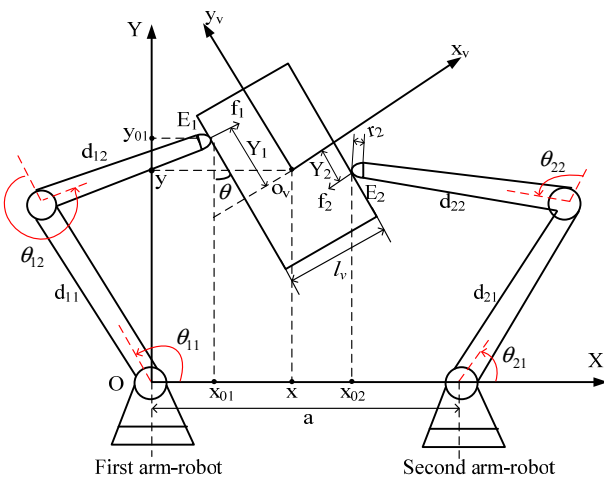
- Thuật toán điều khiển đề xuất để thực nghiệm không cần sử dụng cảm biến lực.

- Thuật toán điều khiển không cần biên dịch sang một ngôn ngữ lập trình nào khác hay nạp vào chip, nhưng vẫn điều khiển hệ thống theo thời gian thực và kiểm chứng nhanh được thuật toán.

2. Mô hình động lực học của hệ tay máy đôi

2.1. Mô tả hệ thống

Hệ tay máy đôi tác giả nghiên cứu gồm hai tay máy giống nhau thao tác với một vật thể hình hộp rắn. Mỗi tay máy là một robot planar có hai bậc tự do, với khâu tác động cuối của từng tay máy tiếp xúc với vật thể tại điểm xác định. Mô hình của hệ thống được minh họa như Hình 1



Hình 1. Mô hình tay máy đôi thao tác một vật thể

OXY: Khung tọa độ gốc, đồng thời là khung tọa độ gắn với tay máy thứ nhất;

$o_v x_v y_v$: Khung tọa độ gắn với trọng tâm của đối tượng.

Đối tượng được chuyển động theo trục OX, OY, và chuyển động xoay.

Các khâu tác động cuối của tay máy đôi tác động lên đối tượng các lực f_1, f_2 tại điểm E_1, E_2 tương ứng. Hai lực này được giả thiết có chiều vuông góc với bề mặt của vật thể. Hệ được giả thiết làm việc trong mặt phẳng nằm ngang nên không chịu tác động của lực trọng trường.

Vector $q_1 = [\theta_{11}, \theta_{21}]^T$ biểu diễn góc quay các khớp của tay máy thứ nhất, $q_2 = [\theta_{12}, \theta_{22}]^T$ biểu diễn góc quay các khớp của tay máy thứ hai, $z = [x, y, \theta]^T$ biểu thị vị trí và góc quay của đối tượng trong khung tọa độ OXY. Thêm nữa d_{ji}, m_{ji} và J_{ji} biểu thị cho chiều dài, khối lượng, mô men quán tính của thanh nối j của tay máy i , với $i=1,2; j=1,2$. $E_i(x_{0i}, y_{0i})$ là vị trí tiếp xúc của tay máy thứ i với đối tượng.

2.2. Phương trình động học và động lực học của hệ thống

Dựa vào Hình 1, vị trí trọng tâm của vật thể được xác

định theo vị trí hai tay máy [9]. Từ đó xây dựng được phương trình ràng buộc hình học để đảm bảo tiếp xúc giữa tay máy đôi và đối tượng.

$$\begin{cases} Q_1 = (x - x_{01}) \cos \theta + (y - y_{01}) \sin \theta - \frac{l_v}{2} = 0 \\ Q_2 = -(x - x_{02}) \cos \theta - (y - y_{02}) \sin \theta - \frac{l_v}{2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Với, L : Bề rộng đối tượng; khoảng cách Y_i từ khâu tác động cuối thứ i tới trục $o_v x_v$ của hệ tọa độ vật thể được xác định như sau:

$$\begin{cases} Y_1 = (x - x_{01}) \sin \theta - (y - y_{01}) \cos \theta \\ Y_2 = (x - x_{02}) \sin \theta - (y - y_{02}) \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

Động lực học của hệ thống gồm tay máy đôi – đối tượng được xác định dựa vào phương pháp Lagrange nhân tử. Phương trình động lực học của tay máy đôi được thiết lập như sau:

$$\tau_i = H_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i - (-1)^i J_{0i}^T \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} f_i \quad (3)$$

Phương trình động lực học của đối tượng được thiết lập như sau:

$$H \ddot{z} + \sum_{i=1}^2 (-1)^i f_i \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ -Y_i \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

Với, $H_i(q_i)$: Ma trận quán tính của tay máy thứ i ; $C_i(q_i, \dot{q}_i)$: ma trận tương hỗ và li tâm của tay máy thứ i , được xác định từ ma trận $H_i(q_i)$ dựa vào tính chất $\dot{H}_i(q_i) - 2C_i(\dot{q}_i, q_i)$ là ma trận nghiêng đối; J_{0i} là ma trận Jacobian của tay máy thứ i ; H_z : ma trận quán tính của vật thể $H_z = \text{diag}[M, M, J]$ với M là khối lượng vật thể và J mô men quán tính của vật thể.

3. Bộ điều khiển phối hợp chuyển động của hệ tay máy đôi

Để tay máy đôi di chuyển vật thể tới vị trí, hướng mong muốn thì trước hết vật thể phải được giữ chắc chắn và ổn định bởi hai tay máy. Vì vậy, vấn đề điều khiển lực được thực hiện trước tiên trong bài toán điều khiển phối hợp chuyển động của hai tay máy. Khi vật thể đã được kẹp ổn định, lúc này hai tay máy sẽ thao tác với vật thể. Vật thể sẽ được xoay, di chuyển đến góc đặt θ_d và vị trí đặt (x_d, y_d) mong muốn. Thuật toán điều khiển được đề xuất dựa trên [10].

Bộ điều khiển tựa mô hình điều khiển hỗn hợp lực và vị trí: Điều khiển lực để kẹp ổn định, điều khiển góc quay và điều khiển vị trí của vật thể tương ứng. Thuật toán điều khiển được đề xuất:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_{f1} + \tau_{\theta1} + \tau_{x1} + \tau_{y1}, \\ \tau_2 &= \tau_{f2} + \tau_{\theta2} + \tau_{x2} + \tau_{y2}. \end{aligned} \quad (5)$$

với, $\tau_f; \tau_{\theta}; \tau_x; \tau_y$ lần lượt là các bộ điều khiển lực, góc xoay và vị trí chuyển động theo trục x, y của vật thể

$$\begin{aligned} \tau_{f_i} = & -(-1)^i J_{0i}^T \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} f_d - K_{v_i} \dot{q}_i \\ & -(-1)^i \frac{1}{l_v} J_{0i}^T \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} (Y_1 - Y_2) f_d \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó: lực đặt f_d là lực tiếp xúc mong muốn, được chọn theo thông số của đối tượng; K_{v_i} là ma trận hệ số của bộ điều khiển xác định dương.

$$\tau_{\theta_i} = -(-1)^i \left(\frac{\beta_f}{l_v - r_1 - r_2} \Delta \theta - \alpha_f \dot{\theta} \right) \left(J_{0i}^T \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} + (-1)^i r_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

với $\Delta \theta = \theta_d - \theta$ là sai số của góc xoay; β_f và α_f là các hệ số xác định dương.

$$\begin{aligned} \tau_{x_i} &= \eta_x \left[r_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \sin \theta_d - \left(\frac{\partial x_{0i}}{\partial q_i} \right)^T \right] (x_a - x_d), \\ \tau_{y_i} &= \eta_y \left[-r_i \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cos \theta_d - \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial q_i} \right)^T \right] (y_a - y_d). \end{aligned} \quad (8)$$

với

$$x_a = \frac{x_{01} + x_{02}}{2} + \frac{Y_1 + Y_2}{2} \sin \theta_d, y_a = \frac{y_{01} + y_{02}}{2} - \frac{Y_1 + Y_2}{2} \cos \theta_d,$$

tham số của bộ điều khiển η_x, η_y là các hằng số xác định dương.

Thế phương trình (5) vào phương trình (3) rồi nhân 2 vế của phương trình với \dot{q}_i^T , phương trình động lực học của hệ được mô tả:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^2 \dot{q}_i^T H_i \dot{q}_i + M\dot{x}^2 + M\dot{y}^2 + J_v \dot{\theta}^2 + \frac{1}{l_v} (Y_1 - Y_2)^2 f_d \right) \\ & + \frac{d}{dt} \left(\beta_f \Delta \theta^2 + 2\eta_x (x_a - x_d)^2 + 2\eta_y (y_a - y_d)^2 \right) \\ & = - \sum_{i=1}^2 \dot{q}_i^T K_{v_i} \dot{q}_i - \alpha_f (l_v - r_1 - r_2) \dot{\theta}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Dựa vào phương trình (9) hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^2 \dot{q}_i^T H_i \dot{q}_i + M\dot{x}^2 + M\dot{y}^2 + J_v \dot{\theta}^2 + \frac{1}{l_v} (Y_1 - Y_2)^2 f_d \right) \\ & + \frac{1}{2} \left(\beta_f \Delta \theta^2 + 2\eta_x (x_a - x_d)^2 + 2\eta_y (y_a - y_d)^2 \right) \end{aligned}$$

Khi đó đạo hàm của hàm Lyapunov

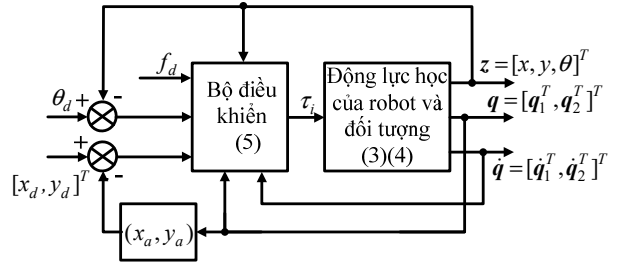
$$\dot{V} = - \sum_{i=1}^2 \dot{q}_i^T K_{v_i} \dot{q}_i - \alpha_f (l_v - r_1 - r_2) \dot{\theta}^2.$$

Từ hàm Lyapunov lựa chọn và đạo hàm của hàm Lyapunov, nhận được $V \geq 0$ và $\dot{V} \leq 0$. Dấu bằng $V = 0$ và $\dot{V} = 0$ chỉ có được khi

$$\begin{cases} f_1, f_2 & \rightarrow f_d \\ \dot{q}_1, \dot{q}_2 & \rightarrow 0 \\ \dot{z} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})^T & \rightarrow 0 \\ \theta & \rightarrow \theta_d \\ x_a & \rightarrow x_d \\ y_a & \rightarrow y_d \end{cases} \quad \text{khi } t \rightarrow \infty.$$

Như vậy theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov hệ thống ổn định tiệm cận. Các tay máy đã kẹp ổn định đối tượng, điều khiển vị trí và hướng của đối tượng tới vị trí và hướng mong muốn.

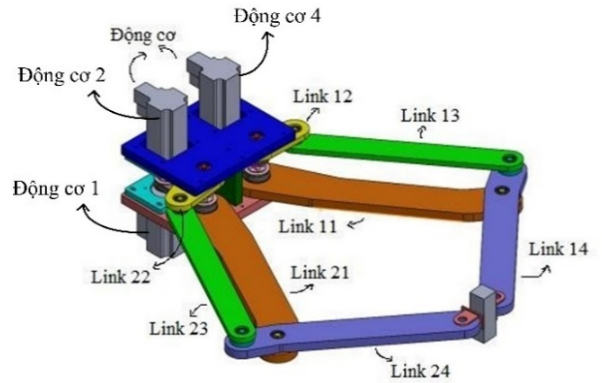
Kết luận lại sơ đồ tổng quan của hệ thống và bộ điều khiển được mô tả trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống bộ điều khiển lực, vị trí và hướng

4. Thiết kế cơ khí cho mô hình thực nghiệm tay máy đôi

Hệ tay máy đôi là một hệ gồm hai tay máy phẳng giống hệt nhau phối hợp chuyển động cùng giữ và di chuyển một đối tượng rắn chung. Hình ảnh thiết kế cơ khí của tay máy đôi như Hình 3.



Hình 3. Thiết kế cơ khí tay máy đôi

Với thiết kế cơ khí như vậy, hệ thống được làm việc như sau: Mỗi tay máy sử dụng hai động cơ điều khiển chuyển động cho hai góc khớp. Trước hết phân tích làm việc của tay máy thứ hai, tay máy thứ hai sử dụng hai động cơ là động cơ 1 và động cơ 2 để điều khiển chuyển động cho hai khớp. Động cơ 1 điều khiển chuyển động cho khớp 1 (điều khiển chuyển động link 21), động cơ 2 điều khiển chuyển động cho khớp 2 (điều khiển chuyển động link 24), để tránh sử dụng đai truyền chuyển động từ động cơ 2 tới khớp thứ 2 (đai có độ dài lớn) làm tăng thời gian trễ, sai số chuyển động của khớp. Tác giả sử dụng thanh dẫn động (link 22, link 23) để truyền chuyển động từ động cơ 2 tới

khớp 2, khi động cơ chuyển động thì link 22 và link 23 cũng chuyển động, link 22 và link 23 chuyển động được bao nhiêu thì link 24 (khớp 2) chuyển động được bấy nhiêu. Tương tự như tay máy thứ hai, tay máy thứ nhất cũng sử dụng hai động cơ để điều khiển chuyển động cho hai khớp (điều khiển chuyển động link 11 và link 14). Điều khiển chuyển động của khớp 2 (link 14) của tay máy thứ nhất được thông qua chuyển động của thanh dẫn động link 12 và link 13, khi động cơ 4 chuyển động thì link 12 và link 13 chuyển động, link 12 và link 13 chuyển động được bao nhiêu thì link 14 chuyển động được bấy nhiêu.

Phần thiết kế cơ khí của tay máy đôi có các thông số như trong Bảng 1.

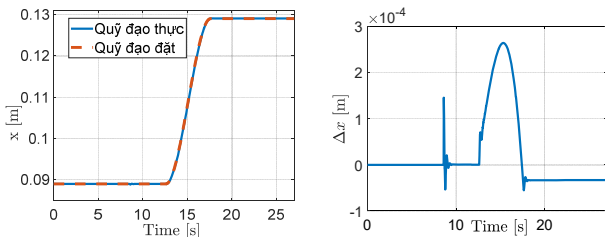
Bảng 1. Thông số tay máy và đối tượng

| Các khâu | Khối lượng (Kg) | Chiều dài (m) |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| Link 11; Link 21 | 1,1305 | 0,4 |
| Link 12; Link 22 | 0,156 | 0,07 |
| Link 13; Link 23 | 0,414 | 0,35 |
| Link 14; Link 24 | 0,85 | 0,3 |
| Khoảng cách hai tay máy | - | 0,12 |
| Đối tượng | 0,15 | 0,14 |

5. Mô phỏng

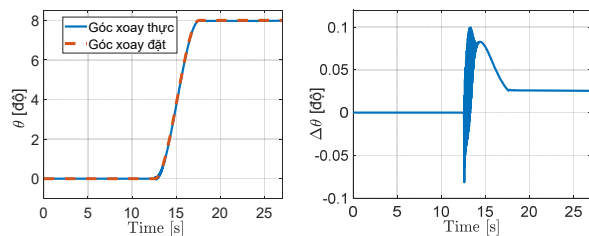
5.1. Điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục x , hướng chuyển động của đối tượng

Kết quả mô phỏng điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục x , hướng chuyển động của đối tượng dùng bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí. Với quỹ đạo vị trí và hướng chuyển động của đối tượng theo quỹ đạo bậc 3 được thể hiện trong Hình 4 – Hình 5.



a) Quỹ đạo chuyển động b) Sai số vị trí của đối tượng

Hình 4. Quỹ đạo hướng chuyển động của đối tượng dọc theo trục x trong mô phỏng



a) Quỹ đạo chuyển động b) Sai số góc xoay

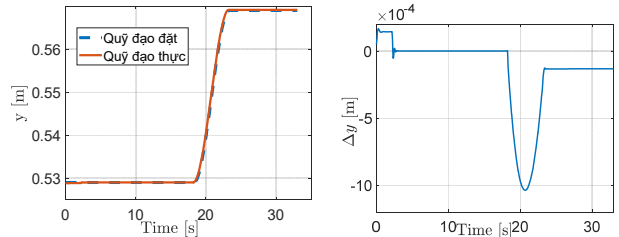
Hình 5. Quỹ đạo hướng chuyển động của đối tượng trong mô phỏng với bộ điều khiển hỗn hợp lực/vị trí chuyển động theo trục x

Từ kết quả mô phỏng Hình 4 – Hình 5 có thể thấy rằng bộ điều khiển hỗn hợp lực, vị trí theo trục x , hướng chuyển động cho kết quả tốt. Sai lệch vị trí theo trục x lớn nhất là 0,075%, hướng lớn nhất là 1%. Đối tượng được chuyển

động tới vị trí, hướng mong muốn với sai lệch tĩnh rất nhỏ lần lượt là 0,002% và 0,25%. Tại vị trí cân bằng đối tượng được giữ ổn định.

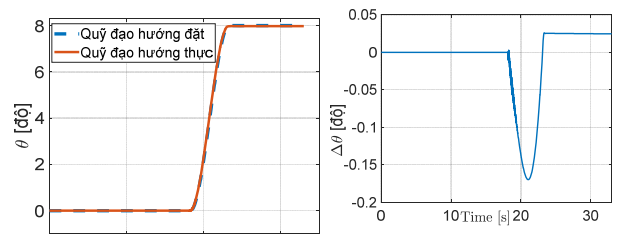
5.2. Điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục y , hướng chuyển động của đối tượng

Kết quả mô phỏng điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục y , hướng chuyển động của đối tượng dùng bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí. Với quỹ đạo vị trí và hướng chuyển động của đối tượng theo quỹ đạo bậc 3 được thể hiện trong Hình 6 – Hình 7.



a) Quỹ đạo chuyển động b) Sai số vị trí của đối tượng

Hình 6. Quỹ đạo chuyển động theo trục y của đối tượng trong mô phỏng



a) Quỹ đạo chuyển động b) Sai số góc xoay của đối tượng

Hình 7. Quỹ đạo hướng chuyển động của đối tượng trong mô phỏng với bộ điều khiển hỗn hợp lực/vị trí chuyển động theo trục y

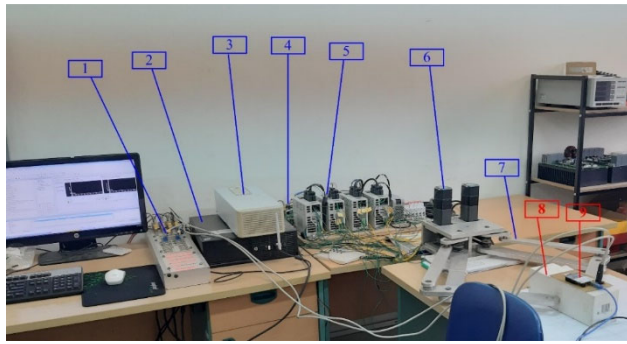
Từ kết quả mô phỏng Hình 6 – Hình 7 có thể thấy rằng bộ điều khiển hỗn hợp lực, vị trí theo trục y , hướng chuyển động cho kết quả tốt. Sai lệch vị trí theo trục y lớn nhất là 0,08 %, hướng lớn nhất là 1,8%. Đối tượng được chuyển động tới vị trí, hướng mong muốn với sai lệch tĩnh rất nhỏ lần lượt là 0,025% và 0,5%. Tại vị trí cân bằng đối tượng được giữ ổn định.

Từ kết mô phỏng Hình 4 – Hình 7 thấy, bộ điều khiển làm việc tốt và ổn định. Đối tượng được giữ chặt và chắc chắn trong quá trình di chuyển, kết quả có được quỹ đạo vị trí và hướng của đối tượng đã bám với quỹ đạo đặt. Sai lệch tĩnh nhỏ, quỹ đạo chuyển động dọc theo trục x sai lệch tĩnh nhỏ hơn 0,08 %, quỹ đạo chuyển động dọc theo trục y sai lệch tĩnh nhỏ hơn 1%, quỹ đạo hướng chuyển động sai lệch tĩnh nhỏ hơn 1%, độ quá điều chỉnh nhỏ dưới 1%. Hình 4b – Hình 7b cho thấy, tại vị trí cân bằng sai lệch tĩnh là hằng số, chứng tỏ đối tượng được giữ ổn định tại vị trí cân bằng.

6. Thử nghiệm

6.1. Cấu trúc và hoạt động của hệ thống thử nghiệm

Hệ thống thử nghiệm và thử nghiệm hệ thống theo kịch bản được mô phỏng như phần 5 sẽ được trình bày trong mục này. Hệ thống thử nghiệm được thực hiện như Hình 8.



Hình 8. Hệ thống thực nghiệm

1: DS1103 interface box; 2: Máy tính (phần mềm Matlab và Controldesk); 3: DS1103; 4: Board kết nối; 5: Driver; 6: Động cơ servo; 7: Mô hình tay máy đôi; 8: Đối tượng; 9: Mạch đo góc xoay của đối tượng.

Thuật toán được viết và xây dựng trên Matlab/ Simulink và sử dụng phần mềm Control desk biên dịch. Lúc này các tín hiệu từ bộ điều khiển qua card DS1103, qua hộp giao diện để đưa tín hiệu điều khiển tới driver của động cơ servo thông qua một board kết nối. Tín hiệu từ driver của động cơ sẽ điều khiển chuyển động cho động cơ servo từ đó điều khiển chuyển động các khớp của tay máy đôi.

Tốc độ chuyển động của động cơ sẽ được đo bằng encoder, tín hiệu này sẽ được chuyển tới Matlab/Simulink thông qua hộp giao diện của DS1103 (qua cổng INC), trên phần mềm Matlab/Simulink tín hiệu từ encoder sẽ được chuyển thành tín hiệu góc xoay của các khớp, và phản hồi lại cho bộ điều khiển.

Vị trí của đối tượng sẽ được tính gián tiếp qua góc xoay của các khớp. Còn hướng (góc xoay) của đối tượng sẽ được đo bằng cảm biến MPU6050. Vị trí, hướng của đối tượng sẽ được phản hồi lại cho bộ điều khiển.

6.2. Thử nghiệm hệ thống

Đối tượng được thiết kế chuyển động theo quỹ đạo bậc 3 bao gồm chuyển động theo trục x , trục y và hướng xoay. Lực đặt của tay máy đôi tại điểm tiếp xúc tác động lên đối tượng với $f_d = 1,5N$. Các thông số của bộ điều khiển sử dụng trong thực nghiệm được xác định như Bảng 2.

Bảng 2. Thông số bộ điều khiển

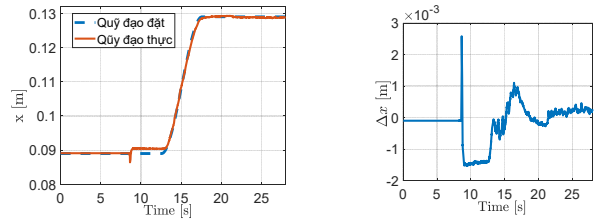
| K_{v1} | K_{v2} | β_f | η_x | η_y |
|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 2 | 2 | 2,5 | 400 | 300 |

6.2.1. Điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục x và hướng của đối tượng

Kết quả thực nghiệm điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục x và hướng chuyển động của đối tượng dùng bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí, với quỹ đạo vị trí và hướng chuyển động của đối tượng được thể hiện trong Hình 9 – Hình 10.

Đối tượng được điều khiển di chuyển theo quỹ đạo dọc trục x từ vị trí có tọa độ $x = 8,9\text{ cm}$ tới vị trí có tọa độ $x = 12,9\text{ cm}$, quỹ đạo hướng góc xoay từ góc 0^0 tới góc 8^0 . Sai lệch tính chuyển động theo trục x là 1 mm (2,5%), hướng chuyển động $0,2^0$ (2,5%). Từ kết quả thực nghiệm Hình 9 – Hình 10 có thể thấy, bộ điều khiển hỗn hợp lực,

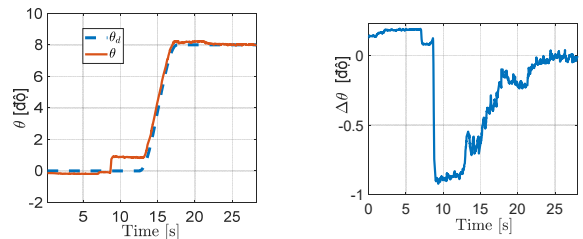
vị trí theo trục x và hướng chuyển động của đối tượng cho kết quả tốt. Đối tượng được chuyển động tới vị trí, hướng mong muốn với sai lệch tính nhỏ (2,5%). Tại vị trí cân bằng đối tượng được giữ ổn định.



a) Quỹ đạo chuyển động

b) Sai số vị trí

Hình 9. Quỹ đạo chuyển động của đối tượng dọc theo trục x trong thực nghiệm



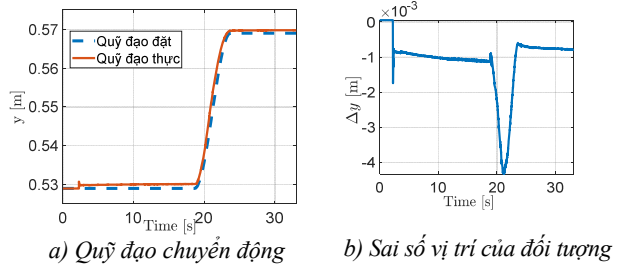
a) Quỹ đạo chuyển động

b) Sai số hướng

Hình 10. Quỹ đạo hướng chuyển động của đối tượng trong thực nghiệm với bộ điều khiển hỗn hợp lực/vị trí chuyển động theo trục x

6.2.2. Điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục y và hướng của đối tượng

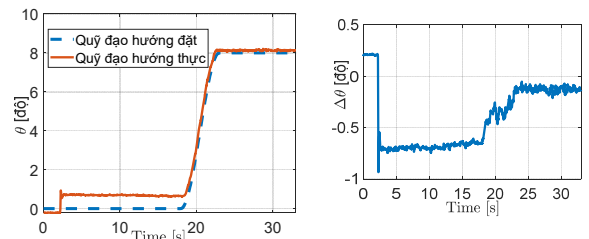
Kết quả thực nghiệm điều khiển hỗn hợp lực, vị trí chuyển động theo trục y và hướng chuyển động của đối tượng dùng bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí, với quỹ đạo vị trí và hướng chuyển động của đối tượng được thể hiện trong Hình 11– Hình 12.



a) Quỹ đạo chuyển động

b) Sai số vị trí của đối tượng

Hình 11. Quỹ đạo chuyển động của đối tượng dọc theo trục y trong thực nghiệm



a) Quỹ đạo chuyển động

b) Sai số hướng

Hình 12. Quỹ đạo hướng chuyển động của đối tượng trong thực nghiệm với bộ điều khiển hỗn hợp lực/vị trí chuyển động theo trục y

Đối tượng được điều khiển di chuyển theo quỹ đạo dọc trục y từ vị trí có tọa độ $y=52,9\text{ cm}$ tới vị trí có tọa độ $y=56,9\text{ cm}$, quỹ đạo hướng góc xoay từ góc 0^0 tới góc 8^0 . Sai lệch tĩnh chuyển động theo trục y là $0,8\text{ mm}$ (2%), hướng chuyển động $0,2^0$ (2,5%). Từ kết quả thực nghiệm Hình 11 – Hình 12 có thể thấy, bộ điều khiển hỗn hợp lực, vị trí theo trục y và hướng chuyển động của đối tượng cho kết quả tốt. Đối tượng được chuyển động tới vị trí, hướng mong muốn với sai lệch tĩnh nhỏ (2%). Tại vị trí cân bằng đối tượng được giữ ổn định.

Từ kết quả thực nghiệm 9 – Hình 12 cho thấy, bộ điều khiển làm việc tốt và ổn định. Đối tượng được giữ chặt và chắc chắn trong quá trình di chuyển. Như trong Hình 9a – Hình 12a, kết quả có được quỹ đạo vị trí và hướng của đối tượng đã bám với quỹ đạo đặt, với sai lệch tĩnh nhỏ, quỹ đạo chuyển động dọc theo trục x sai lệch tĩnh nhỏ hơn 2,5%, quỹ đạo hướng chuyển động theo trục y sai lệch tĩnh nhỏ hơn 2,0%, quỹ đạo hướng chuyển động sai lệch tĩnh nhỏ hơn 2%, độ quá điều chỉnh nhỏ dưới 2,5%. Hình 9b – Hình 12b cho thấy, tại vị trí cân bằng sai lệch tĩnh là hằng số, chúng ta đối tượng được giữ ổn định tại vị trí cân bằng. Như vậy bộ điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí đề xuất cho kết quả thực nghiệm tốt.

Kết quả mô phỏng Hình 4 - Hình 7 và kết quả thực nghiệm Hình 9 - Hình 12 cho thấy, kết quả mô phỏng và thực nghiệm khi chạy thử nghiệm phương pháp điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí có kết quả tương đồng. Dạng đồ thị quỹ đạo và sai số chuyển động theo trục x , trục y và hướng chuyển động của đối tượng giữa mô phỏng và thực nghiệm dạng giống nhau, sai số của kết quả mô phỏng nhỏ hơn, có chất lượng tốt hơn. Do trong mô phỏng hệ thống là lý tưởng, khâu, khớp của các tay máy chuyển động lý tưởng, đáp ứng mô men của bộ điều khiển cung cấp cho các khớp là ngay lập tức.

7. Kết luận

Vấn đề điều khiển hỗn hợp lực và vị trí trong hệ thống tay máy đôi – đối tượng đã được nghiên cứu giải quyết bằng sử dụng thuật toán điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí trong bài này. Đồng thời, độ điều khiển cho hệ thống đã được mô phỏng kiểm chứng cũng như kiểm chứng nhanh theo thời gian thực bằng card điều khiển thời gian thực DSPACE1103. Các kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, dạng

đồ thị quỹ đạo chuyển động và sai số chuyển động của hai kết quả có dạng tương đồng. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cũng đều cho thấy, quỹ đạo chuyển động của đối tượng đã bám với quỹ đạo đặt, tại vị trí cân bằng đối tượng được giữ ổn định. Qua đó thấy được rằng, thuật toán điều khiển tựa mô hình hỗn hợp lực/vị trí đã đề xuất làm việc tốt và ổn định. Đây là cơ sở để thấy thuật toán đề xuất có tính khả thi khi đưa vào hệ thống thực tế.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Điện Lực (EPU) theo dự án số ĐTKHCN.19/2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Zheng, L. Han, and W. Xu, "A Dual-arm Cooperative Manipulator: Modularized Design and Coordinated Control", in *2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 2018, pp. 945-950.
- [2] T. Liu, Y. Lei, L. Han, W. Xu, and H. Zou, "Coordinated resolved motion control of dual-arm manipulators with closed chain", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1-14, 2016.
- [3] J. Lee, P. H. Chang, and R. S. Jamisola, "Relative impedance control for dual-arm robots performing asymmetric bimanual tasks", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3786-3796, 2013.
- [4] H. Sadeghian, F. Ficuciello, L. Villani, and M. Keshmiri, "Global impedance control of dual-arm manipulation for safe interaction", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 22, pp. 767-772, 2012.
- [5] K. Benali, J.-F. Brethé, F. Guérin, and M. Gorka, "Dual arm robot manipulator for grasping boxes of different dimensions in a logistics warehouse", in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 147-152.
- [6] D. Jinjun, G. Yahui, C. Ming, and D. Xianzhong, "Symmetrical adaptive variable admittance control for position/force tracking of dual-arm cooperative manipulators with unknown trajectory deviations", *Robotics Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 357-369, 2019.
- [7] D. Kruse, J. T. Wen, and R. Radke, "A sensor-based dual-arm tele-robotic system", *IEEE Transactions on Automation Science Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 4-18, 2014.
- [8] K.-T. Park, C.-H. Park, and Y.-J. Shin, "Performance evaluation of industrial dual-arm robot", in *2008 International Conference on Smart Manufacturing Application*, 2008, pp. 437-440.
- [9] L. T. Hue, D. M. Duc, and P. T. A. Nguyen, "Adaptive force/position control for dual-arm system based on neural network radial basis function without using a force sensor", *The university of Danang - journal of science and technology*, vol. 18, no. 12.1, pp. 1-7, 2020.
- [10] A. Nguyen, S. Arimoto, "Dexterous manipulation of an object by means of multi DOF robotic fingers with soft tips", *Journal of Robotic Systems*, vol. 19, no. 7, pp. 349-362, 2002.