

PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC VÀ CÁC CẤU HÌNH KỲ DỊ CỦA TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẲNG 3 BẬC TỰ DO

KINEMATICS AND SINGULARITY ANALYSIS OF 3 DEGREE-OF-FREEDOM PLANAR PARALLEL ROBOTIC MANIPULATORS

Dương Tân Quốc¹, Lê Tiến Dũng²

¹*Đại học Duy Tân; duongtanquoc@dtu.edu.vn*

²*Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ltdung@dut.udn.vn*

Tóm tắt - Bài báo phân tích tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR (Revolute – Revolute – Revolute). Đề tính toán cho hệ thống điều khiển tay máy robot trong không gian làm việc, mô hình động học ngược và động học thuận của tay máy robot 3-RRR được xây dựng. Đó là mô hình thể hiện mối quan hệ giữa khớp chủ động và vị trí trên hệ tọa độ Descartes, góc xoay của khâu chấp hành cuối. Các ma trận suy ra từ động học chính là các ma trận Jacobian, và sau đó ứng dụng các ma trận này vào tìm các cấu hình kỳ dị. Hơn nữa, việc tìm được các ma trận Jacobian này còn giúp cho việc tính toán động lực học phục vụ cho việc điều khiển bằng phương pháp điều khiển tĩnh toán lực. Các kết quả được kiểm chứng trên Matlab/Simulink kết hợp SolidWorks nhằm phục vụ cho việc thiết kế kích thước, quỹ đạo chuyển động, phân tích không gian làm việc loại trừ các cấu hình kỳ dị, tính mô hình động lực học và điều khiển của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do.

Từ khóa - tay máy robot song song phẳng; cấu hình kỳ dị; động học thuận; động học ngược; không gian làm việc.

1. Đặt vấn đề

Trong thực tế có nhiều loại kiến trúc tay máy khác nhau đã được nghiên cứu sử dụng rộng rãi trong công nghiệp. Tay máy robot song song cho hiệu năng cao hơn về độ chính xác, độ bền và khả năng tải lớn khi so với tay máy nối tiếp. Nó đã được ứng dụng trong rất nhiều ứng dụng từ sản xuất hàng hóa, gia công cơ khí đến mô phỏng máy bay, và trở nên phổ biến hơn trong công nghiệp công cụ cơ khí hóa trên thế giới [1]. Đề điều khiển tay máy robot, người ta thường dùng lý thuyết điều khiển robot song song [6] của các tác giả Lei Liu, Quanmin Zhu, Lei Cheng, Yongji Wang, Dongya Zhao.

Mô hình tay máy tổng quát đã được Yang, Guilin, Weihai Chen, I. Chen đưa ra [3]. Mô hình tay máy robot song song phẳng 3-RRR dựa theo phương pháp DH (Denavit & Hartenberg, 1955) đã được Serdar Küçük đưa ra [4]. Trong sách [6] các tác giả Lei Liu, Quanmin Zhu, Lei Cheng, Yongji Wang, Dongya Zhao đã nêu ra việc ứng dụng các kỹ thuật điều khiển như điều khiển đồng bộ, điều khiển trực quyet, điều khiển thích nghi một cách tổng quát cho nhiều đối tượng robot khác nhau. Đối với việc nghiên cứu các cấu hình kỳ dị thì đã được nêu một cách tổng quát cho các loại robot song song [1] của tác giả Merlet J.P.

Merlet J.P. [1], đã trình bày các cách tìm ra cấu hình kỳ dị tổng quát cho các loại tay máy robot song song. Cấu hình kỳ dị xảy ra khi các góc chủ động và vị trí, góc xoay của khâu chấp hành cuối theo một mối quan hệ vô nghiệm, hay nói cách khác, xét về Toán học sẽ không tồn tại giá trị biến trong phương trình giữa góc chủ động và tọa độ, góc xoay của khâu chấp hành cuối. Xét về phương diện Vật lý của mô hình thực tế, thì đó là khi các thanh của tay máy robot bị căng

Abstract - This article analyzes 3 degree-of-freedom planar parallel robotic manipulator 3-RRR (Revolute – Revolute – Revolute). For computation of control system of the robot in workspace, inverse kinematic and forward kinematic model of robot 3-RRR are firstly created. These models demonstrate the bond of active joints and positions on Descartes coordinates, the angle of end-effector. The matrices which are derived from kinematic models are called Jacobian matrices which then are applied to find out singularity configurations. Moreover, Jacobian matrices are helpful to calculate dynamic model which is used for computed torque control algorithm. The results of this paper are verified by simulation using Matlab/Simulink combined with SolidWorks, which are helpful for designing dimension and trajectory, analysing singularities avoidance, computing dynamic model and control algorithm of the robot manipulator.

Key words - planar parallel robotic manipulators; singularity; forward kinematics; inverse kinematics; workspace.

ra hoặc gấp lại. Nếu tay máy robot bị rơi vào trường hợp đó thì chắc chắn một điều là việc điều khiển sẽ khó khăn và không bám tốt quỹ đạo đặt ra, hay thậm chí không thể điều khiển được. Chính vì vậy, việc tìm ra một không gian làm việc loại trừ các cấu hình kỳ dị được coi là việc tất yếu trong thiết kế điều khiển tay máy robot nói chung và tay máy robot song song phẳng nói riêng.

Trong bài báo này sẽ lần lượt trình bày các mô hình động học được mô tả theo dạng hình học, nó khác với phương pháp DH như trong bài báo [4] của Serdar Küçük. Từ đó các ma trận Jacobian cũng được xây dựng nhằm biểu diễn mối quan hệ giữa vận tốc góc của robot trong hệ tọa độ khớp chủ động và tọa độ trong hệ tọa độ Descartes, góc xoay khâu chấp hành cuối. Dựa trên các ma trận Jacobian đó, bài báo sẽ đi vào phân tích các loại cấu hình kỳ dị của tay máy robot. Sau đó, để kiểm tra các kết quả đạt được, bài báo thực hiện mô phỏng trên Matlab/Simulink và SimMechanics trích xuất từ SolidWorks.

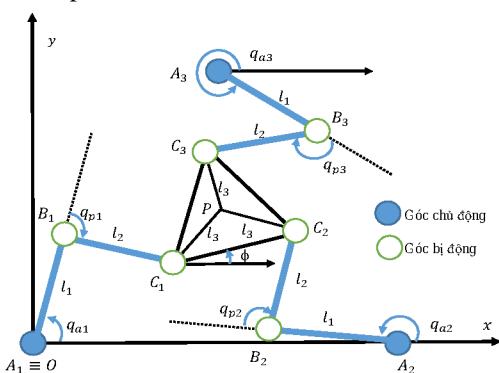
Nội dung bài báo được trình bày với các phần như sau: Phần 1 là đặt vấn đề cho việc nghiên cứu. Phần 2 là mô hình động học thuận và động học ngược. Phần 3 trình bày các ma trận Jacobian. Phần 4 giới thiệu các cấu hình kỳ dị và không gian làm việc. Phần 5 mô phỏng kiểm nghiệm kết quả đạt được, và cuối cùng, Phần 6 sẽ là kết luận của bài báo.

2. Mô hình động học

Xét mô hình tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR như trên Hình 1, hoạt động trên mặt phẳng nằm ngang trong hệ tọa độ Descartes. Các vector như sau:

- $\mathbf{q}_a = [q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}]^T$ là vector góc chủ động.

- $\mathbf{q}_p = [q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}]^T$ là vector góc bị động.
- $\mathbf{X} = [x_p, y_p, \phi_p]^T$ là vector tọa độ và góc xoay của khâu chép hành cuối.



Hình 1. Tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR

Với mô hình tay máy robot này, lực tác động được đưa vào các khớp chủ động (q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}) để điều khiển tọa độ và quỹ đạo chuyển động của khâu chép hành cuối trong hệ tọa độ (x, y). Điều đó dẫn đến việc tìm mô hình động học thuận và động học ngược được xây dựng theo quan hệ giữa hệ tọa độ khớp chủ động (q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}) và hệ tọa độ (x, y) và góc xoay ϕ_p , hay nói cách khác, đó là quan hệ giữa vector \mathbf{q}_a và vector \mathbf{X} .

2.1. Động học thuận

Để tìm động học thuận của tay máy robot song song phẳng 3-RRR, theo mô tả hình học [5] như Hình 1 có được:

$$[x_p - x_{Ai} - l_1 \cos q_{ai} - l_3 \cos(\phi_p + \psi_i)]^2 + [y_p - y_{Ai} - l_1 \sin q_{ai} - l_3 \sin(\phi_p + \psi_i)]^2 = l_2^2 \quad (1)$$

Với: $\psi_i = [\pi/6; 5\pi/6; 3\pi/2]; i = 1, 2, 3$.

Phương trình trên thể hiện mối quan hệ giữa vector góc chủ động \mathbf{q}_a và vector \mathbf{X} . Giải phương trình (1) theo phương pháp số, thu được mô hình động học thuận, đó chính là mối quan hệ giữa vector \mathbf{X} và vector \mathbf{q}_a .

Trong quá trình tính toán, để điều khiển bám quỹ đạo đã đặt ra, cần thêm giá trị tham số tính toán, đó là vector góc bị động \mathbf{q}_p . Để tìm góc bị động \mathbf{q}_p , đưa vào mô tả hình học, thu được:

$$\mathbf{q}_p = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - x_{Ci}^2 - y_{Ci}^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (2)$$

Với tọa độ cả điểm C_i được tính từ phương trình:

$$x_{Ci} = x_p + l_3 \cos(\phi_p + \psi_i) - x_{Ai} \quad (3)$$

$$y_{Ci} = y_p + l_3 \sin(\phi_p + \psi_i) - y_{Ai} \quad (4)$$

2.2. Động học ngược

Tương tự mô hình động học thuận, mô hình động học ngược được tính dựa trên mô tả hình học, góc chủ động \mathbf{q}_a được tính từ:

$$\mathbf{q}_a = \tan^{-1} \left(\frac{y_{Ci}}{x_{Ci}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + x_{Ci}^2 + y_{Ci}^2}{2l_1 \sqrt{x_{Ci}^2 + y_{Ci}^2}} \right) \quad (5)$$

3. Các ma trận Jacobian

Tùy mô tả hình học như Hình 1, có được:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{oi} + l_1 \cos q_{ai} + l_2 \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ y_{oi} + l_1 \sin q_{ai} + l_2 \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ + l_3 \cos(\psi_i + \phi_p) \\ + l_3 \sin(\psi_i + \phi_p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Đạo hàm phương trình (6) theo thời gian thu được:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_{ai} \sin q_{ai} - l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ l_1 \dot{q}_{ai} \cos q_{ai} + l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ -l_3 \dot{\phi}_p \sin(\psi_i + \phi_p) \\ + l_3 \dot{\phi}_p \cos(\psi_i + \phi_p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Từ (7) rút gọn, thu được phương trình thể hiện quan hệ giữa $\dot{\mathbf{q}}_a$ và $\dot{\mathbf{X}}$:

$$J_{z1} \dot{\mathbf{X}} = J_o \dot{\mathbf{q}}_a \quad (8)$$

Trong đó:

- $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{\phi}_p]^T$ là vector vận tốc khâu chép hành cuối.

- $\dot{\mathbf{q}}_a = [\dot{q}_{a1}, \dot{q}_{a2}, \dot{q}_{a3}]^T$ là vector vận tốc góc chủ động.

Các ma trận Jacobian thu được như sau:

$$J_{z1} = \begin{bmatrix} az1_1 & bz1_1 & cz1_1 \\ az1_2 & bz1_2 & cz1_2 \\ az1_3 & bz1_3 & cz1_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_o = \begin{bmatrix} dz1_1 & 0 & 0 \\ 0 & dz1_2 & 0 \\ 0 & 0 & dz1_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Với: $i = 1, 2, 3$

$$\begin{cases} az1_i = \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ bz1_i = \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ cz1_i = -l_3 \sin(q_{ai} + q_{pi} - \psi_i - \phi_p) \\ dz1_i = l_1 \sin q_{pi} \end{cases}$$

Phương trình (8) có thể viết lại là:

$$\dot{\mathbf{q}}_a = J_{oz} \dot{\mathbf{X}} \quad (11)$$

$$J_{oz} = J_o^{-1} J_{z1} \quad (12)$$

Như vậy, Phần 3 này đã giới thiệu về các ma trận Jacobian một cách đầy đủ, các ma trận này sẽ được dùng để phân tích các cấu hình kỳ dị của tay máy robot trong phần tiếp theo. Hơn nữa, các ma trận Jacobian này còn được dùng cho mô hình động lực học phục vụ cho việc điều khiển tay máy robot.

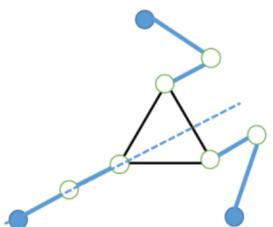
4. Các cấu hình kỳ dị và không gian làm việc

Theo Merlet J.P. trong [1] đã trình bày các cách tìm ra cấu hình kỳ dị tổng quát cho các loại tay máy robot song song. Trong khi các cách tìm cấu hình kỳ dị khác đều dựa vào ma trận Jacobian và kết cấu hình học [12, 13] thì đối với tay máy robot được xét trong bài báo này, khi xảy ra cấu hình kỳ dị thì phương trình (12) trở nên vô nghiệm. Tức là J_o vô nghiệm hoặc J_{z1} vô nghiệm, hoặc cả J_o và J_{z1} vô nghiệm. Như vậy dẫn đến có tất cả 3 khả năng xảy ra cấu hình kỳ dị.

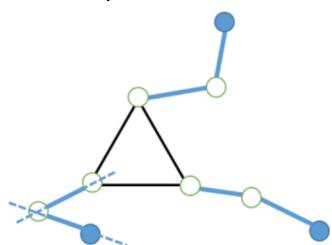
4.1. Cấu hình kỳ dị loại I

Cấu hình kỳ dị loại I xảy ra khi $\det(J_o) = 0$ và $\det(J_{z1}) \neq 0$. Điều này xảy ra khi thanh l_1 và l_2 xếp thẳng hàng hoặc bị gập lại như Hình 2 và Hình 3.

Trong trường hợp này, lực tác động vào khớp chủ động có thể làm lệch tay máy robot, các thanh hoặc bị căng ra hoặc bị gấp lại [11, 12, 13].



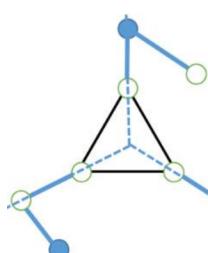
Hình 2. Cấu hình kỳ dị loại 1 khi các thanh bị căng



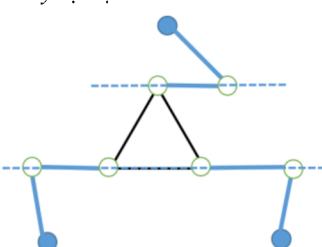
Hình 3. Cấu hình kỳ dị loại 1 khi các thanh song song nhau

4.2 Cấu hình kỳ dị loại 2

Cấu hình kỳ dị loại 2 xảy ra khi $\det(J_o) \neq 0$ và $\det(J_{z1}) = 0$. Điều này xảy ra khi các tay máy cắt nhau tại 1 điểm hoặc các tay máy song song nhau như Hình 4 và Hình 5.



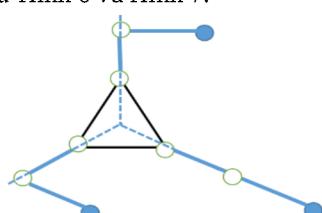
Hình 4. Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các thanh cắt nhau tại 1 điểm



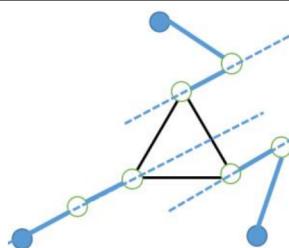
Hình 5. Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các thanh song song nhau

4.3 Cấu hình kỳ dị loại 3

Cấu hình kỳ dị loại 3 xảy ra khi đồng thời cả $\det(J_o) = 0$ và $\det(J_{z1}) = 0$. Điều này xảy ra khi các thanh vừa bị căng, vừa cắt nhau tại 1 điểm hoặc vừa bị căng, vừa song song nhau như Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị căng, vừa cắt nhau tại 1 điểm

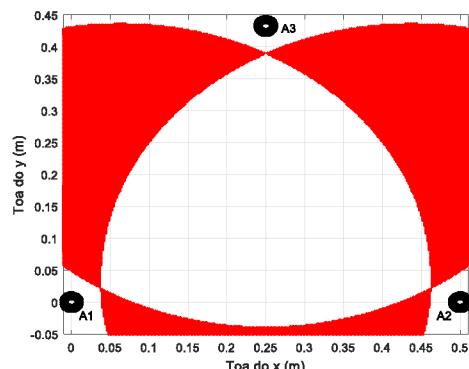


Hình 7. Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị căng, vừa song song nhau

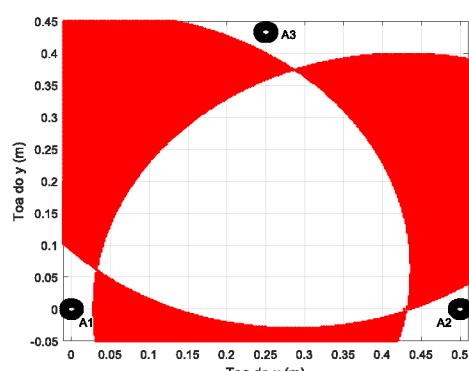
Rõ ràng thấy được là khi xảy ra bất cứ cấu hình kỳ dị nào thì phương trình (12) sẽ không thỏa mãn, hay nói cách khác là nó không có nghiệm. Từ đó dẫn đến tay máy robot song song sẽ mất đi độ cứng vững của nó, vốn là ưu điểm khi so sánh với tay máy nối tiếp. Để loại trừ cấu hình kỳ dị, có thể dựa vào kích thước hình học để tìm ra 1 kích thước hợp lý, tuy nhiên cũng không thể loại trừ hết tất cả các cấu hình kỳ dị. Một cách khác là di tìm vùng không gian làm việc không có cấu hình kỳ dị, tức là vùng làm việc loại trừ điểm kỳ dị, sau đó thiết kế quỹ đạo làm việc trong vùng không gian làm việc đó để đảm bảo không có cấu hình kỳ dị xảy ra, và trong bài báo này sẽ chọn và trình bày theo cách này.

4.4 Không gian làm việc

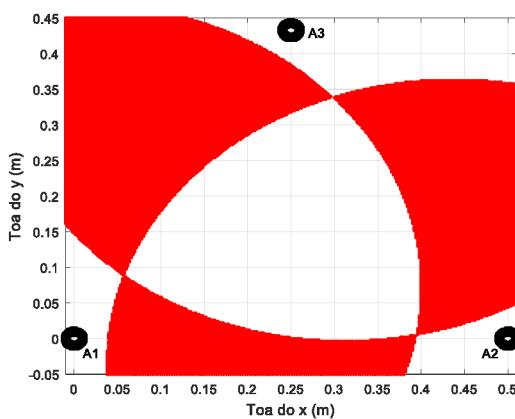
Để tìm không gian làm việc loại trừ điểm kỳ dị, trước tiên tìm cấu hình kỳ dị dựa vào các ma trận Jacobian J_o và J_{z1} với điều kiện $\det(J_o) = 0$ và $\det(J_{z1}) = 0$ [1, 14]. Trong bài báo này, mô hình robot 3-RRR lựa chọn kích thước với chiều dài các thanh như sau: $l_1 = 0,2\text{ m}$; $l_2 = 0,2\text{ m}$; $l_3 = 0,0722\text{ m}$; khoảng cách giữa hai khớp chủ động: $0,5\text{ m}$. Kết quả mô phỏng không gian làm việc trên Matlab được trình bày từ Hình 8 đến Hình 11 tương ứng độ thay đổi góc ϕ_p ban đầu của khâu chấp hành cuối.



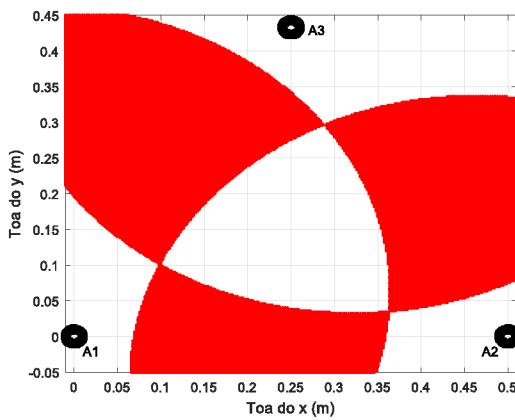
Hình 8. Không gian làm việc khi $\phi_p = 0^0$



Hình 9. Không gian làm việc khi $\phi_p = 30^0$



Hình 10. Không gian làm việc khi $\phi_P = 60^\circ$



Hình 11. Không gian làm việc khi $\phi_P = 90^\circ$

Từ kết quả trên, nhận thấy được là khi tăng góc ϕ_P ban đầu của khâu chấp hành cuối và giữ nguyên giá trị đó trong quá trình điều khiển, không gian làm việc của tay máy robot càng nhỏ dần, điều này dễ dàng thấy được là do kích thước hình học của nó.

5. Mô phỏng kiểm chứng

Để điều khiển mô hình tay máy robot song song phẳng, bài báo dựa vào thuật toán điều khiển tính toán lực (Computed Torque Control) như đã được nêu ra trong [2, 7, 8, 9, 10, 11, 14] theo công thức:

$$\tau_a = M_a(\ddot{q}_a + K_v \dot{e} + K_p e) + C_a \dot{q}_a + F_a \quad (13)$$

Trong đó:

- τ_a là vector của mô-men đầu vào của khớp chủ động của tay máy robot.

- \ddot{q}_a là vector gia tốc của quỹ đạo mong muốn của các khớp chủ động của tay máy robot.

$$\ddot{q}_a = [\ddot{q}_{a1}, \ddot{q}_{a2}, \ddot{q}_{a3}]^T \quad (14)$$

- \dot{e} là vector sai lệch giữa vận tốc góc mong muốn và góc thực của các khớp chủ động của tay máy robot.

$$\dot{e} = \dot{q}_{da} - \dot{q}_a \quad (15)$$

- e là vector sai lệch giữa giá trị góc mong muốn và góc thực của các khớp chủ động của tay máy robot.

$$e = q_{da} - q_a \quad (16)$$

- K_v và K_p là các ma trận đường chéo xác định dương.

- M_a là ma trận quán tính.

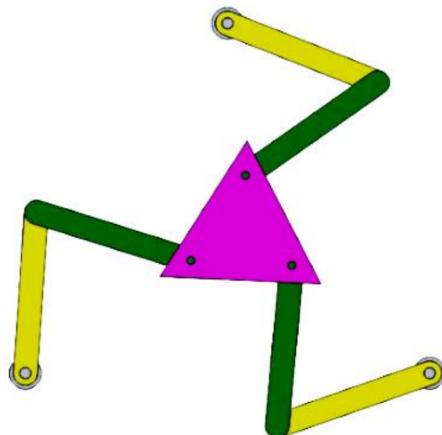
- C_a là ma trận Coriolis và lực hướng tâm.

- F_a là vector của lực ma sát.

Các ma trận M_a , C_a và F_a được tính từ các thông số động học và các ma trận Jacobian của tay máy robot. Các thông số thực của mô hình tay máy robot được mô phỏng từ mô hình cơ khí vẽ bằng phần mềm SolidWorks xuất sang Matlab/Simulink, nên có thể coi thông số mô hình gần chính xác với thực tế.

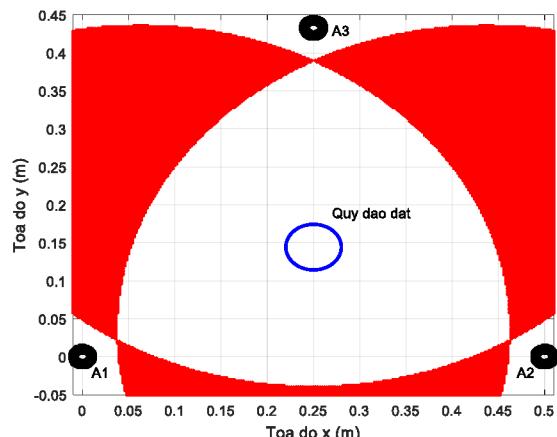
Kích thước tay máy robot được lấy như Mục 4.4. Trước tiên, quỹ đạo đặt được kiểm tra trong không gian làm việc để tránh các cầu hình kỳ dị. Với quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối được chọn là hình tròn có bán kính 0,03m với tâm trong hệ tọa độ Descartes là (0,25; 0,1443), và góc xoay ban đầu $\phi_P = 0^\circ$. Tọa độ điểm đầu tiên của tay máy robot là (0,2573; 0,1452). Các ma trận K_v và K_p được chọn: $K_v = [40\ 0\ 0; 0\ 40\ 0; 0\ 0\ 40]$ và $K_p = [200\ 0\ 0; 0\ 200\ 0; 0\ 0\ 200]$.

Mô hình tay máy được vẽ như hình sau:



Hình 12. Mô hình trên SolidWorks xuất sang Matlab/Simulink

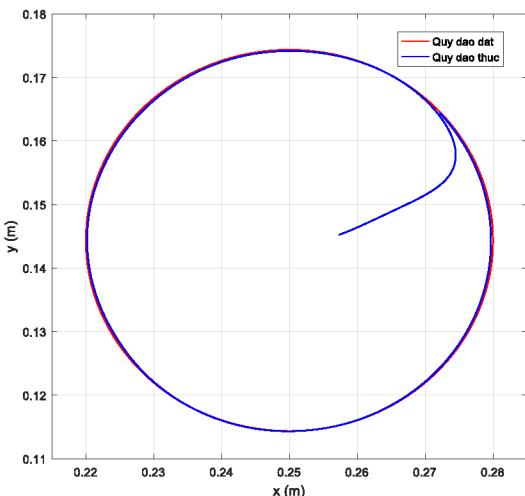
Kết quả kiểm tra không gian làm việc như Hình 13 và kết quả mô phỏng trên Hình 14 và Hình 15.



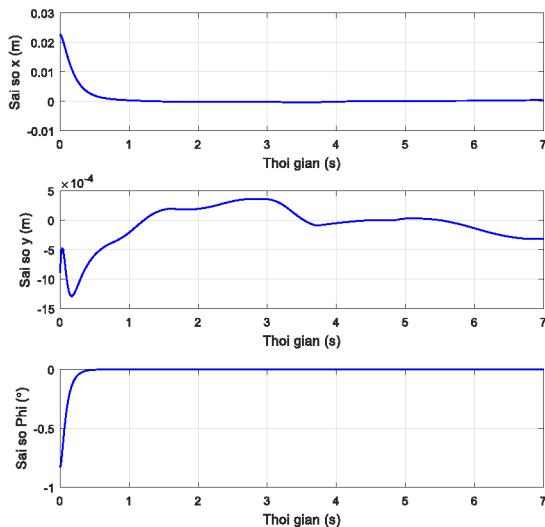
Hình 13. Không gian làm việc loại trừ điểm kỳ dị

Từ kết quả kiểm tra không gian làm việc loại trừ điểm

kỳ dị, nhận thấy được là với quỹ đạo chuyên động chọn như trên sẽ loại trừ được các cấu hình kỳ dị.



Hình 14. Kết quả điều khiển bám theo quỹ đạo đường tròn



Hình 15. Sai số giá trị đặt và giá trị thực

Kết quả mô phỏng cho thấy khâu chấp hành cuối của robot bám tốt theo quỹ đạo hình tròn mong muốn, có nghĩa là kết quả tính toán mô hình động học, các ma trận Jacobian và các phân tích về cấu hình kỳ dị chính xác và được áp dụng thành công.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày về các tính toán mô hình động học của các tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR. Các ma trận Jacobian cũng đã được xây dựng. Dựa trên các ma trận Jacobian đó, bài báo đã phân tích 3 loại cấu hình

kỳ dị và tìm được không gian làm việc loại trừ điểm kỳ dị và ứng dụng thành công trong việc điều khiển. Kết quả của bài báo giúp cho việc thiết kế kích thước, thiết kế quỹ đạo chuyên động, phân tích không gian làm việc loại trừ điểm kỳ dị, nhằm phục vụ tính toán mô hình động lực học và điều khiển của tay máy robot 3-RRR.

Lời ghi nhận

Bài báo là kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Bộ Giáo dục & Đào tạo, mã số KYNH-17 năm 2017, tên đề tài là “Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Merlet J.P., Parallel Robots, Springer, 2006.
- [2] Kok-Meng Lee, Dharman K. Shah, “Dynamic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, 1988, pp. 361-367.
- [3] Yang, Guolin, Weihai Chen, I. Chen, “A geometrical method for the singularity analysis of 3-RRR planar parallel robots with different actuation schemes”, Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Vol. 3, 2002, pp. 2055-2060.
- [4] Serdar Küçük, Serial and parallel robot manipulators – kinematics, dynamics, control and optimization, InTech, 2012.
- [5] K.V.Varalakshmi, Dr.J.Srinivas, “Stiffness Metrics for Design of 3-RRR Flexible Manipulator”, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.2, 2012, pp. 2021-2027.
- [6] Lei Liu, Quanmin Zhu, Lei Cheng, Yongji Wang, Dongya Zhao, Applied Methods and Techniques for Mechatronic Systems, Springer, 2014.
- [7] Quang Dan Le, Hee-Jun Kang, Tien Dung Le, “Adaptive Extended Computed Torque Control of 3 DOF Planar Parallel Manipulators Using Neural Network and Error Compensator”, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9773, 2016, pp. 437-448.
- [8] Tien Dung Le, Hee-Jun Kang, “An Adaptive Tracking Controller for Parallel Robotic Manipulators Based on Fully Tuned Radial Basic Function Networks”, Neurocomputing – Elsevier, Vol.137, 2014.
- [9] Tien Dung Le, Hee-Jun Kang, Young-Soo Suh, “Chattering-Free Neuro-Sliding Mode Control of 2-DOF Planar Parallel Manipulators”, International Journal of Advanced Robotic Systems, 10(22), 2013, pp. 1-15.
- [10] Lu Ren, James K. Mills, Dong Sun, “Adaptive Synchronization Control of a Planar Parallel Manipulator”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128, 2006, pp. 976-979.
- [11] Lu Ren, James K. Mills, “Performance Improvement of Tracking Control for a Planar Parallel Robot Using Synchronized Control”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 2539-2544.
- [12] H.R. Mohammadi Daniali, P.J. Zsombor-Murray, J. Angeles, “Singularity Analysis of a General Class of Planar Parallel Manipulators”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1995, pp. 1547-1552.
- [13] K.H. Patel, V.C. Nayakpara, Y.K. Patel, Y.D. Patel, “Workspace and singularity analysis of 3-RRR planar parallel manipulator”, International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms, 2013, pp. 1071-1077.
- [14] Lê Tiến Dũng, Đoàn Quang Vinh, “Phân tích động học và các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng hai bậc tự do”, Chuyên san Kỹ thuật Điều khiển & Tự động hóa, Tạp chí Tự động hóa Ngày nay, Số 8, 2013, tr.26-32.