

Nghiên cứu xây dựng mô hình động học robot bốn chân TITAN-VIII trên cơ sở cấu trúc của robot

Research on designing dynamic model of TITAN-VIII quadruped robot based on the robot structure

Nguyễn Văn Tiến*, Đỗ Khắc Tiệp

Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

*Tác giả liên hệ: nguyenvantien@vimaru.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/7/2024 ; Ngày chấp nhận đăng: 12/9/2024

Tóm tắt:

Robot bốn chân có nhiều ưu điểm hơn robot dạng bánh xe ở bởi có khả năng cơ động cao, di chuyển trên mọi địa hình. Tuy nhiên, bài toán điều khiển robot bốn chân sẽ khó thực hiện do mô hình động học của robot có bậc cao và quá trình động lực học diễn ra phức tạp, chính vì vậy, cần thực hiện các phương pháp giảm bậc khi thực hiện xây dựng phương trình động học cho robot bốn chân. Bài báo đề xuất một phương pháp đơn giản hóa để xác định phương trình động học cho robot bốn chân tên là TITAN-VIII. Quy tắc Denavit-Hartenberg (D-H) được sử dụng để phân tích động học thuận. Các phương trình động học ngược được xác định trên cơ sở toán học và cấu trúc chân robot. Kết quả nghiên cứu được mô phỏng trên phần mềm MATLAB Simulink.

Từ khóa: Động học thuận robot; Động học ngược robot; Denavit-Hartenberg; MATLAB Simulink; Robot bốn chân.

Abstract:

Quadruped robots have many advantages over wheeled robots in that they have high mobility and can move on any terrain. However, the control problem of four-legged robots will be more complicated because the robot's kinematic model has a high order and the dynamic process is complicated, so it is necessary to implement order reduction methods when constructing kinematic equations for four-legged robots. The article proposes a simplified method to determine the kinematic equations for four-legged robots called TITAN-VIII. The Denavit-Hartenberg (D-H) rule is used to analyze the forward kinematics. The inverse kinematic equations are determined on the basis of mathematics and the structure of the robot's legs. The research results are simulated on MATLAB Simulink software.

Keywords: Forward kinematic; Inverse kinematic; Denavit-Hartenberg, MATLAB Simulink; Quadruped robot.

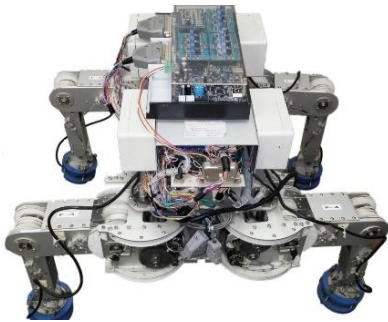
1. Giới thiệu

Robot tự hành bốn chân được ứng dụng nhiều trong các công việc đòi hỏi tính cơ động cao, di chuyển trên mọi địa hình như vận chuyển hàng hóa, cứu nạn, thăm dò. Khi thiết kế điều khiển cho robot bốn chân cần quan tâm đến hai vấn đề đó là điều khiển vị trí của robot và giữ ổn định trọng tâm để robot không bị đổ khi di chuyển. Việc điều khiển robot đến một vị trí mong muốn thực hiện

thông qua việc giải bài toán động học để tìm ra góc quay tương ứng của từng khớp. Xét về mặt cấu trúc, robot bốn chân có mười hai bậc tự do và động học dạng phi tuyến [1], do vậy, vấn đề điều khiển phức tạp hơn so với robot dạng bánh xe. Ngoài ra, trọng tâm robot bốn chân luôn thay đổi khi robot di chuyển, có thể bị đổ nếu hình chiếu của trọng tâm bị lệch ra ngoài đa giác đỡ [2], dẫn tới bài toán cần phải giữ ổn định trọng tâm. Trong khuôn khổ mục đích của bài báo, nhóm tác giả đề cập đến

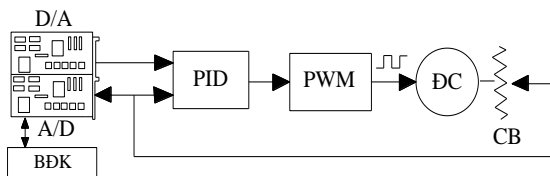
việc nghiên cứu giải quyết vấn đề xác định giá trị góc khớp khi biết trước vị trí robot cần đạt tới (động học vị trí). Phương pháp giữ ổn định trọng tâm được đề cập đến trong nghiên cứu khác của nhóm nghiên cứu [3]. Một số nghiên cứu đã đề cập đến bài toán động học vị trí robot bốn chân lai giữa kiểu bò và bánh xe [4], [5], đối tượng trong bài báo là TITAN-VIII có nhiều điểm khác biệt về cấu trúc chân. Một số công trình khác tập trung vào phương pháp giữ ổn định trọng tâm robot [4], [6] thay vì xây dựng đầy đủ các phương trình động học cho robot.

TITAN-VIII, được sản xuất tại Đại học Tokyo, với kích thước 400 mm x 200 mm, tốc độ tối đa 0.9m/s, tải trọng 5 - 7 kg. Hình ảnh của TITAN-VIII được mô tả như trên Hình 1.



Hình 1. Hình ảnh thực tế robot TITAN-VIII.

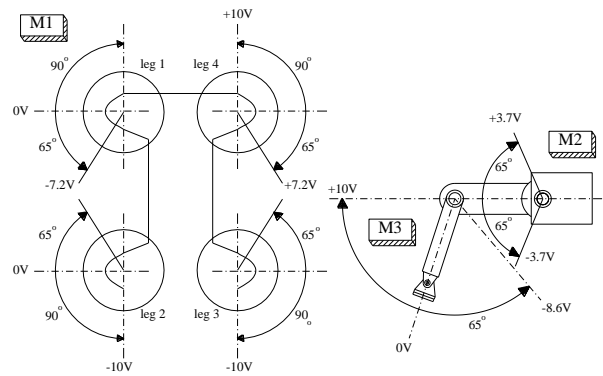
Cấu trúc điều khiển vị trí của mỗi khớp được thể hiện như Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc mạch vòng điều khiển vị trí cho mỗi khớp của robot.

Mỗi chân robot có cấu tạo gồm ba khớp quay được lai bởi ba động cơ một chiều M1, M2 và M3, phạm vi hoạt động của mỗi khớp như Hình 3. Mỗi động cơ được đặt trong một mạch vòng điều khiển độc lập cùng với bộ điều khiển vị trí PID, bộ băm xung PWM (Pulse-width Modulation) và khâu cảm biến vị trí (CB) cho phép đáp ứng nhanh với giá trị đặt. Thuật toán điều khiển được cài đặt trong bộ điều khiển (BĐK). Bộ biến đổi A/D (Analog to Digital) và D/A (Digital to Analog) tạo

ra kênh giao tiếp tín hiệu giữa BĐK (tín hiệu số) và bộ điều khiển vị trí PID (tín hiệu tương tự).

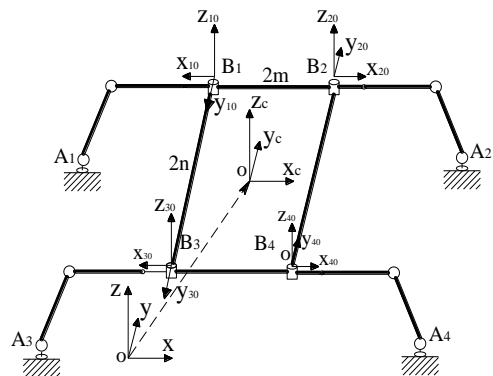


Hình 3. Vị trí và phạm vi hoạt động của các động cơ truyền động TITAN-VIII.

2. Động học của robot TITAN-VIII

Động học khảo sát các mối quan hệ hình học và thời gian của chuyển động, không xét đến nguyên nhân gây ra chuyển động. Trong khảo sát động học, các tham số về lực và moment có thể có hoặc không và các biến quan tâm trong động học là vị trí, tốc độ, gia tốc và thời gian. Mục đích của bài toán động học thuần là xác định vị trí của khâu tác động cuối của bàn chân robot khi biết các biến khớp của các chân.

Để thuận tiện cho việc xây dựng được mô hình, robot cần thiết lập các hệ trục tọa độ theo quy tắc Denavit-Hartenberg (D-H) [6]. Mô hình tương đương của robot TITAN-VIII và hệ tọa độ gắn với robot được cho trong Hình 4 (với $i = 1, 2, 3, 4$ là thứ tự chân).



Hình 4. Vị trí các khung tọa độ của robot.

Trọng tâm robot trong không gian được xác định bằng ba phép quay khung tọa độ góc $Rot(x, \omega)$, $Rot(y, \phi)$, $Rot(z, \psi)$ và phép dịch khung tọa

độ $Tran(x_m, y_m, z_m)$. Ma trận chuyển vị của trọng tâm so với khung tọa độ gốc là 0T_c cho bởi:

$${}^0T_c = Rot(x, \omega).Rot(y, \varphi).Rot(z, \psi).Tran(x_m, y_m, z_m) \quad (1)$$

Khung tọa độ chính của mỗi chân được xác định bằng các ma trận sau:

$${}^cT_{10} = T_c \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -m \\ 0 & -1 & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^cT_{20} = T_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m \\ 0 & 1 & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

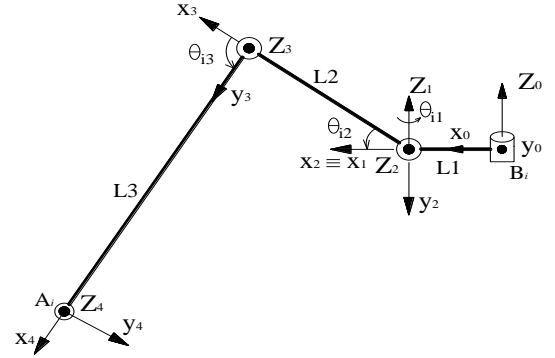
$${}^cT_{30} = T_c \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -m \\ 0 & -1 & 0 & -n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^cT_{40} = T_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m \\ 0 & 1 & 0 & -n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Để robot không bị đổ, cần phải kiểm soát tư thế của robot thông qua việc điều khiển tư thế chân. Mặt khác, tư thế chân robot được quyết định bởi vị trí của hai điểm là B_i (điểm nối giữa chân và thân robot) và A_i (bàn chân robot). Do vậy, cần xây dựng phương trình xác định các góc khớp θ_i thông qua tọa độ B_i và A_i để đơn giản hóa cho vấn đề điều khiển. Tọa độ B_i trong hệ tọa độ gốc được xác định bởi phương trình:

$$B_i = {}^0T_c \cdot {}^cT_{i0} \cdot [x_m \quad y_m \quad z_m \quad 1]^T \quad (6)$$

Chân robot bao gồm ba khớp xoay được thiết lập hệ tọa độ tương tự như một cánh tay robot phẳng ba bậc tự do (Three- links planar arm), trục z trùng với trục xoay của các khớp, trục x đặt theo phương ngang và trục y đặt theo phương thẳng đứng như trong Hình 5.



Hình 5. Khung tọa độ của chân robot.

Đối với TITAN-VIII, các chân của robot khác nhau về hướng nhưng có cùng cấu trúc, vì vậy, chỉ cần phân tích động học của một chân robot. Trên Hình 5 cho thấy cách gán hệ trục tọa độ cho từng khớp của một chân robot. Bảng thông số D-H được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Bảng thông số D-H của TITAN-VIII.

KTD	θ_i	d_i	a_i	α_i
${}^{i0}T_{i1}$	θ_1	0	L_1	0
${}^{i0}T_{i2}$	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$
${}^{i0}T_{i3}$	θ_2	0	L_2	0
${}^{i0}T_{i4}$	θ_3	0	L_3	0

Ma trận chuyển vị cho từng khớp được cho trong (7), (8), (9), (10). Trong đó, kí hiệu $c(\theta)$ thay thế cho $\cos(\theta)$ và $s(\theta)$ thay thế cho $\sin(\theta)$.

$${}^{i0}T_{i1} = \begin{bmatrix} c(\theta_1) & -s(\theta_1) & 0 & L_1 c(\theta_1) \\ s(\theta_1) & c(\theta_1) & 0 & L_1 s(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^{i1}T_{i2} = T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^{i2}T_{i3} = \begin{bmatrix} c(\theta_2) & -s(\theta_2) & 0 & L_2 c(\theta_2) \\ s(\theta_2) & c(\theta_2) & 0 & L_2 s(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^{i3}T_{i4} = \begin{bmatrix} c(\theta_3) & -s(\theta_3) & 0 & L_3c(\theta_3) \\ s(\theta_3) & c(\theta_3) & 0 & L_3s(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Giải phương trình (11) khi đã biết trước vị trí mong muốn của bàn chân robot, thu được góc khớp của các chân robot. Ma trận biểu diễn phép biến đổi tọa độ gốc mỗi chân thành tọa độ tại bàn chân robot thông qua phép nhân các ma trận chuyển vị:

$${}^{i0}T_4 = {}^{i0}T_{i1} \cdot {}^{i1}T_{i2} \cdot {}^{i2}T_{i3} \cdot {}^{i3}T_{i4} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Trong đó:

$$f_{11} = \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \sin(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$$

$$f_{12} = \sin(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)\cos(\theta_3)$$

$$f_{13} = \cos(\theta_1)$$

$$f_{14} = L_1\cos(\theta_1) - L_2\sin(\theta_1)\cos(\theta_2) + L_3\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)$$

$$f_{21} = \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$$

$$f_{22} = \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\cos(\theta_3)$$

$$f_{23} = \sin(\theta_1)$$

$$f_{24} = L_1\sin(\theta_1) + L_2\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) + L_3\cos(\theta_1)$$

Trong điều khiển robot, cần xác định biến khớp khi biết được vị trí, hướng robot muốn đạt đến. Công thức (11) cho biết vị trí của bàn chân robot (trong hệ tọa độ gốc của từng chân) khi biết các góc khớp $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$ ($i = 1, 2, 3, 4$). Trong bài toán ngược lại, khi biết được vị trí bàn chân robot thì cần xác định giá trị các góc khớp. Tức là, cần giải hệ phương trình (12).

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{i0} \\ y_{i0} \\ z_{i0} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i4} \\ y_{i4} \\ z_{i4} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Trong đó, (x_{i4}, y_{i4}, z_{i4}) là tọa độ mong muốn của bàn chân robot (*desired foothold coordinate*).

$$\begin{aligned} \theta_{i1} &= -\alpha \tan((x_{i4} - x_{i0}) / (y_{i4} - y_{i0})) \\ \theta_{i2} &= \alpha \cos\left(\left(B_i \sqrt{E_i^2 + F_i^2}\right) + \alpha \sin\left(E_i / \sqrt{E_i^2 + F_i^2}\right)\right) \\ \theta_{i3} &= \alpha \cos C_i + \alpha \cos\left(B_i \sqrt{E_i^2 + F_i^2}\right) + \alpha \sin\left(E_i / \sqrt{E_i^2 + F_i^2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó:

$$B_i = (z_{i4} - z_{i0}); A_i = \sqrt{(x_{i4} - x_{i0})^2 + (y_{i4} - y_{i0})^2} - L_1$$

$$C_i = (A_i^2 + B_i^2 - L_2^2 - L_3^2); E_i = L_3; C_i + L_2; F_i = L_3 s(C_i)$$

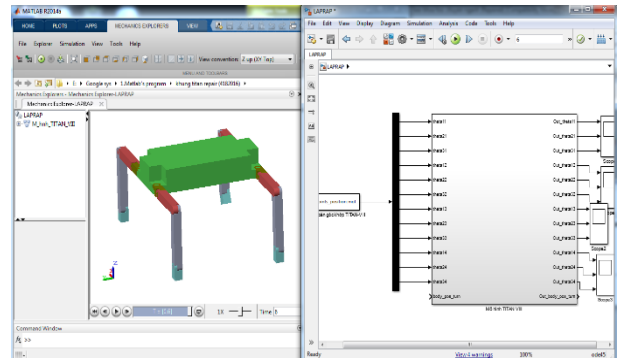
3. Kết quả mô phỏng

Chương trình mô phỏng được tiến hành theo hai bước thực hiện:

- Bước thứ nhất: Thiết kế một mô hình tương đương của TITAN-VIII trên phần mềm SolidWorks theo kích thước thật của robot với chiều dài thân $m = 101$ mm, chiều rộng thân $n = 201$ mm, chiều dài các khớp của chân robot lần lượt là $L3 = 200$ mm, $L2 = 155$ mm, và $L1 = 45$ mm.

- Bước thứ hai: Xuất mô hình từ SolidWorks sang phần mềm MATLAB Simulink để thu được mô hình mô phỏng vật lý. Một chương trình trên Simulink được xây dựng để tính toán các góc khớp theo công thức (13) khi đã biết tọa độ vị trí bàn chân robot và tọa độ vị trí của trọng tâm.

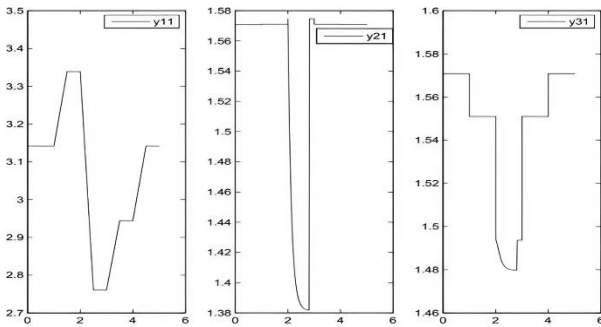
Sơ đồ mô phỏng như trong Hình 6. Mô hình mô phỏng động học robot được thiết kế trên Simulink, hình ảnh mô tả hoạt động robot được thiết kế bằng SolidWorks.



Hình 6. Mô phỏng động học TITAN-VIII trên Simulink.

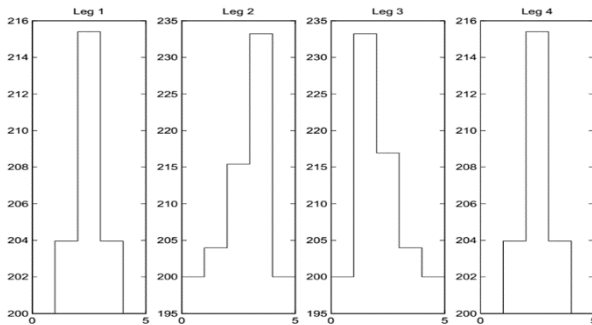
Kích thước cấu trúc của robot gồm $m = 101$, $n = 201$, $L3 = 200$, $L2 = 155$ và $L1 = 45$. Tư thế ban đầu được đưa ra bởi vị trí của chân với $\theta_{i1} = 0$, θ_{i2}

$= 0$ và $\theta_{i3} = 90^0$, do đó, chiều dài của chân và chiều cao của cơ thể lần lượt là $L_0 = 252$ mm và $H_0 = 236$ mm. Ở trạng thái ban đầu của robot, khi đó, sai chân lớn nhất và góc quay tối đa trong một chu kỳ dáng đi lần lượt là $S_{max} = 226$ mm và $\varnothing_{max} = \pm 44^0$ [8]. Sự thay đổi của các biến khớp θ_{11} , θ_{12} và θ_{i3} trong thời gian mô phỏng được chỉ ra như trên Hình 7. Một chu kỳ chuyển động của robot được thực hiện trong vòng 5 giây. Tại thời điểm $t = 0 \div 1$ giây, robot ở trạng thái ban đầu với giá trị các biến khớp bằng giá trị khởi tạo. Tại thời điểm $t = 1 \div 2$ giây, robot di chuyển chân thứ nhất về phía sau theo hướng chuyển động, khi θ_{11} tăng lên ở chu kỳ đầu tiên và đạt đến một góc ổn định ở cuối chu kỳ. Nhận thấy rằng, θ_{13} thay đổi vì chiều dài của chân thứ nhất đã tăng lên một khoảng cách. Tại thời điểm $t = 2 \div 3$ giây, chân thứ nhất được nhấc khỏi mặt đất và xoay về phía trước. Theo trình tự các bước trong θ_{11} và θ_{21} được tăng liên tục để giữ cho chân thứ nhất luôn ở trên mặt đất trong suốt thời gian $t = 3 \div 4$ giây và khi $t = 4 \div 5$ giây, trở lại góc ban đầu vào cuối chu kỳ.

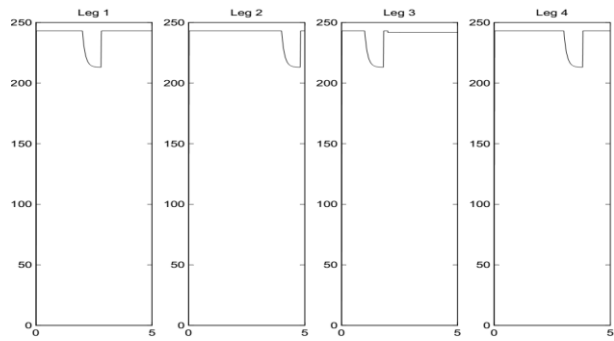


Hình 7. Sự thay đổi các biến khớp của bốn chân robot với độ cao ban đầu $H_0 = 243$ mm.

Sự thay đổi độ dài và độ cao của bốn chân trong một chu trình chuyển động được thể hiện ở Hình 8 và Hình 9.



Hình 8. Sự thay đổi độ dài của bốn chân trong một chu kỳ chuyển động.



Hình 9. Sự thay đổi độ cao của bốn chân robot trong một chu kỳ chuyển động.

Vì robot di chuyển không thay đổi độ cao của trọng tâm, nên sự khác biệt giữa H_i ở đầu chu kỳ và cuối cùng bằng không. Tại nút quay của lưới, robot thay đổi dáng đi, từ dáng đi thẳng sang dáng đi đứng yên-quay để di chuyển theo hướng mới. Chiều dài thay đổi của chân trong quá trình này được thể hiện trong Hình 8.

4. Kết luận

Bài báo đã cho thấy cách thức giải quyết bài toán động học vị trí cho robot bốn chân TITAN-VIII dựa trên quy tắc D-H và phân tích cấu trúc vật lý của robot, kết quả là các phương trình xác định giá trị góc từng khớp khi biết vị trí robot trong không gian (7), (8), (9), (10), (11). Các phương trình động học được sử dụng để xây dựng một chương trình tính toán trên MATLAB, cho phép xác định giá trị góc của từng khớp ứng với các vị trí và hướng khác nhau. Kết quả của bài báo là cơ sở để thực hiện các nghiên cứu sâu hơn về động học robot, phân tích động lực học hay phân tích chuyển động của robot bốn chân.

Tài liệu tham khảo

- [1] K. Izumi, M. K. Habib, K. Watanabe and R. Sato, "Behavior selection based navigation and obstacle avoidance approaching visual and ultrasonic sensory information for Quadruped robots", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 5, no. 4, pp.152-155, 2008, doi: 10.5772/6234.
- [2] X. Chen, K. Watanabe, K. Kiguchi, and K. Izumi, "Implementation of omnidirectional crawl for a quadruped robot", *Advanced Robotics*, vol. 15, pp. 169-190, 2001, doi: 10.1163/15685530152116218.
- [3] V. T. Nguyen, B. -W. Ahn and C. O Bae, "Optimizing path finding based on dijkstra's algorithm for a

- quadruped walking robot TITAN-VIII,” *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 23, no. 5, pp. 574-584, 2017, doi: 10.7837/kosomes.2017.23.5.574.
- [4] M. A. Sen, V. Bakircioglu and M. Kalyoncu, “Inverse kinematic analysis of a quadruped robot,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 6, pp. 285-289, 2017.
- [5] S. Hirose, “A study of design and control of a quadruped walking,” *Int. J. Robot. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 113-133, 1984, doi: 10.1177/027836498400300210.
- [6] Đ. T. Thắng và P. M. Quân, *Giáo trình Điều khiển Robot công nghiệp và ứng dụng*. Hà Nội: NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2013.
- [7] S. Hirose et al., “Quadruped walking robots at Tokyo Institute of Technology”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no.2, pp. 104-114, Jun. 2009, doi: 10.1109/MRA.2009.932524.