

XÂY DỰNG MÔ HÌNH ROBOT THÁM HIỂM DẠNG HEXAPOD

TRƯƠNG CẨM THÀNH¹ - BÙI TRỌNG ĐỨC¹
- PHẠM PHÚ MINH LỘC¹ - PHAN VĨNH LỘC¹ - NGUYỄN TƯỜNG LONG^{1*}

¹ Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Ho Chi Minh City University of Technology,

Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

*Tác giả liên hệ - Email: ntlong@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài: 1/7/2026

Ngày sửa bài: 14/7/2026

Ngày duyệt đăng bài: 28/7/2026

Tóm tắt:

Bài báo trình bày quy trình nghiên cứu động học thuận và nghịch, xây dựng mô hình robot thám hiểm hình dạng Hexapod, nhằm giải quyết bài toán di chuyển linh hoạt trên các địa hình gồ ghề và phức tạp. Về mặt thiết kế cơ khí, robot được xây dựng dựa trên nguyên lý mô phỏng sinh học loài cua biển với kết cấu 6 chân đối xứng qua thân lục giác đều. Mỗi chân sở hữu 3 bậc tự do (3-DOF), bao gồm: các khớp Coxa, Femur và Tibia, được tối ưu hóa hình học để vừa đảm bảo không gian hoạt động rộng, vừa hạ thấp trọng tâm nhằm tăng tính ổn định chống lật. Hệ thống điều khiển thời gian thực sử dụng cấu trúc Master-Slave với vi điều khiển ESP32, chịu trách nhiệm tính toán động học và mạch driver PCA9685 điều phối xung PWM cho 18 động cơ servo MG90s có bánh răng kim loại. Các chi tiết khung vỏ và chân robot được thiết kế để sẵn sàng gia công bằng công nghệ in 3D FDM từ vật liệu nhựa PLA/PETG.

Từ khóa: robot thám hiểm, động học robot, hoạch định quỹ đạo

Design and modeling of a hexapod exploration robot

Abstract:

This study presents the forward and inverse kinematic analysis and development of a hexapod exploration robot designed for flexible locomotion over rough and complex terrain. The mechanical structure is inspired by sea-crab biomimetics, featuring six legs symmetrically arranged around a regular hexagonal chassis. Each leg has three degrees of freedom comprising Coxa, Femur, and Tibia joints, geometrically optimized to provide a wide workspace while lowering the center of gravity for improved tipping stability. The real-time control system employs a master-slave architecture in which an ESP32 microcontroller performs kinematic calculations and a PCA9685 driver controls PWM signals for 18 metal-gear MG90s servo motors. The chassis and leg components are designed for FDM 3D printing using PLA and PETG materials.

Keywords: hexapod exploration robot, robot kinematics, trajectory planning

1. Đặt vấn đề

Theo báo cáo từ Market.us, thị trường robot toàn cầu dự kiến sẽ tăng mạnh từ 48,2 tỷ USD (2024) lên đến 233,7 tỷ USD vào năm 2034, với tốc độ tăng trưởng kép mỗi năm là 17,1% (Market.us, 2024). Đặc biệt, trong các lĩnh vực tiềm ẩn nhiều rủi ro như thăm dò, cứu hộ tại các khu vực nguy hiểm, robot thể hiện rõ ưu điểm trong việc hỗ trợ con người thực hiện công việc một cách an toàn (International Federation of Robotics [IFR], 2023), (L. Đ. Thiện, và các tác giả,..2025). Nghiên cứu này nhằm tạo ra nền tảng để ứng dụng vào giải quyết vấn đề di chuyển trên địa hình gập bất lợi cho các loại robot bánh xe, bánh xích và drone như bùn lầy, cát lún, không gian hẹp nhiều vật cản,... Về mặt thiết kế cơ khí, robot được xây dựng dựa trên các mô hình Hexabot với kết cấu 6 chân đối xứng qua thân (Dupeyroux et al., 2017). Mỗi chân có 3 bậc tự do (3-DOF), bao gồm: các khớp Coxa, Femur và Tibia, được tối ưu hóa hình học để vừa đảm bảo không gian hoạt động rộng, vừa hạ thấp trọng tâm nhằm tăng tính ổn định chống lật. Về mặt động học và hoạch định quỹ đạo, nghiên cứu đã thiết lập hệ phương trình động học thuận bằng phương pháp ma trận Denavit-Hartenberg (D-H) và động học nghịch bằng phương pháp lượng giác hình học phẳng. Để quỹ đạo chuyển động được mượt mà thì trong pha vung được thiết lập thông qua đường cong Bézier bậc 2, kết hợp với dáng đi Tripod Gait để đảm bảo robot luôn ở trạng thái ổn định khi di chuyển (Deng et al., 2017; Grzelczyk et al., 2017).

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Động học thuận

Bảng 1. Bảng tham số động học D-H

Khâu (i)	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	L_1	0	90	θ_1
2	L_2	0	0	θ_2
3	L_3	0	0	θ_3

Bài toán động học thuận xác định vị trí điểm cuối bàn chân $P(x,y,z)$ trong không gian dựa trên giá trị góc quay hiện tại của các khớp $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ và kích thước hình học các khâu L_1, L_2, L_3 . Ma trận chuyển đổi tổng quát T_3^0 từ hệ tọa độ gốc $\{0\}$ tại hông đến hệ tọa độ bàn chân $\{3\}$ được thiết lập qua tích các ma trận biến đổi D-H thành phần:

$$T_3^0 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (1)$$

Khai triển ma trận thu được hệ phương trình tọa độ vị trí bàn chân:

$$x = [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)] \cos \theta_1 \quad (2)$$

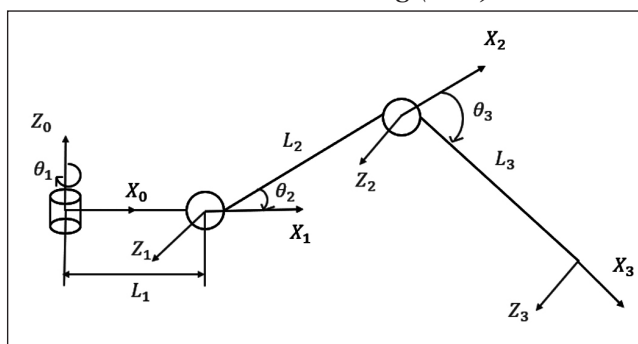
$$y = [L_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)] \sin \theta_1 \quad (3)$$

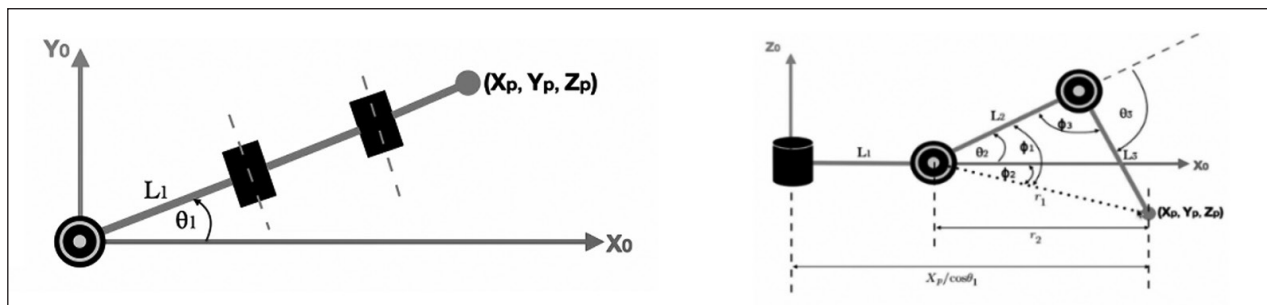
$$z = L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (4)$$

2.2. Động học nghịch

Bài toán động học nghịch tính toán các góc quay khớp $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ cần thiết để đưa bàn chân đến tọa độ mong muốn $P(x,y,z)$ trong không gian làm việc. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hình học phẳng nhằm giảm chi phí tính toán, giúp vi điều khiển xử lý thời gian thực.

Hình 1. Sơ đồ gán hệ trục tọa độ Denavit-Hartenberg (D-H)



Hình 2. Hệ tọa độ chân robot O_{xy} và O_{xz} 

Gọi r_1 là độ dài đoạn thẳng nối từ trục của khớp thứ 2 đến end effector

r_2 là khoảng cách giữa trục servo thứ 2 đến end effector theo phương X_0

Góc xoay hông θ_1 trên mặt phẳng O_{xy} được xác định bởi:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_p}{X_p} \quad (5)$$

Chiều chân robot lên mặt phẳng làm việc O_{xz} ta tính được:

$$r_1 = \sqrt{Z_p^2 + r_2^2} \quad (6)$$

$$d = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2} \quad (7)$$

$$r_2 = d - L_1 \quad (8)$$

Áp dụng định lý hàm số cosin cho tam giác cấu thành bởi 2 khâu L_2, L_3 , góc đùi θ_2 và góc cẳng chân θ_3 được giải ra dạng closed-form:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 + r_1^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot r_1} \right) + \tan^{-1} \frac{Z_p}{r_2} \quad (9)$$

$$\theta_3 = -\pi + \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - r_1^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3} \right) \quad (10)$$

3. Thiết kế và xây dựng mô hình robot thám hiểm hình dạng Hexapod

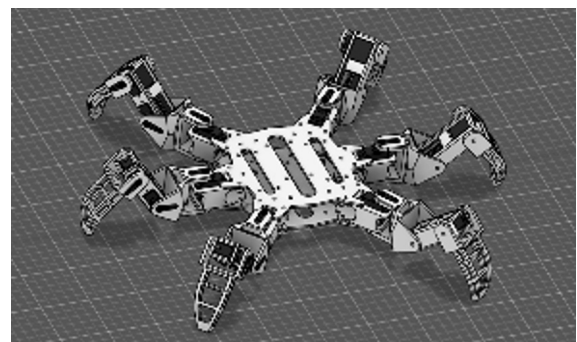
Nghiên cứu đề xuất mô hình tổng thể tích hợp đồng bộ giữa thiết kế kết cấu cơ khí, mô hình động học và hệ thống điều khiển. Cấu trúc robot gồm 6 chân đối xứng phân bố quanh khung thân, mỗi chân gồm 3 bậc tự do được điều khiển độc lập bởi các servo.

3.1. Thiết kế cơ khí

3.1.1. Lựa chọn vật liệu và công nghệ chế tạo

Công nghệ chế tạo sử dụng công nghệ in 3D FDM (Fused Deposition Modeling) giúp tối ưu hóa thời gian thử nghiệm, chi phí sản xuất và dễ dàng tùy biến kết cấu.

Hình 3. Tổng thể khung cơ khí robot Hexapod trong Fusion 360



Bảng 2. Phân vùng vật liệu cho từng chi tiết

STT	Số lượng	Tên	Vật liệu	Chiều dài khâu (mm)
1	6	Part đỡ động cơ	Nhựa PLA	
2	6	Coxa	Nhựa PETG	54
3	6	Femur	Nhựa PETG	45

4	6	Tibia	Nhựa PETG	77
5	18	Động cơ servo	Nhựa kỹ thuật	
6	2	Thân	Nhựa PLA	

3.1.2. Thiết kế kết cấu chân 3 bậc tự do

Mỗi chân robot gồm 3 khâu liên kết với nhau qua các khớp quay, cung cấp 3 bậc tự do:

Khớp Coxa: Quay quanh trục thẳng đứng, đảm nhiệm vai trò đưa chân quét tiến hoặc lùi dọc theo thân robot.

Khớp Femur: Quay quanh trục ngang, chịu lực tải lớn nhất của toàn bộ thân robot để nâng đỡ và thực hiện nâng/hạ chân.

Khớp Tibia: Quay quanh trục ngang, chịu trách nhiệm điều chỉnh tầm vươn xa và cao độ của điểm tiếp xúc đất.

3.1.3. Kết cấu khung thân 2 tầng và tối ưu trọng tâm (CoG)

Kết cấu tổng thể của robot hexapod được xây dựng dựa trên nguyên lý đối xứng nhằm cân bằng tải trọng và tối ưu hóa thuật toán điều khiển.

Thân robot được thiết kế theo cấu trúc phân tầng:

Tầng dưới: bố trí pin (linh kiện có khối lượng nặng nhất) nhằm hạ thấp tối đa trọng tâm của robot và giảm nguy cơ bị lật khi leo dốc.

Tầng trên: bố trí các mạch điều khiển như ESP32, PCA9685 và các cảm biến.

6 chân robot được chia đều sang 2 bên thân theo sơ đồ đối xứng gương qua trục dọc của thân máy.

3.2. Thiết kế dáng đi

Nghiên cứu tập trung ứng dụng dáng đi Tripod Gait kết hợp kỹ thuật đường cong Bézier bậc 2 nhằm tối ưu hóa sự mượt mà trong chuyển động.

3.2.1. Lựa chọn và phân nhóm dáng đi Tripod Gait

Chu kỳ di chuyển của mỗi nhóm chân được chia thành 2 pha (Deng et al., 2017; Liu et al., 2020):

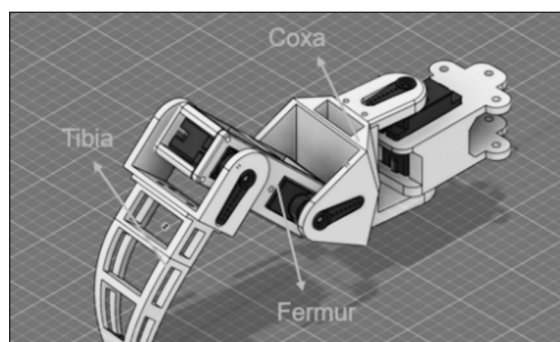
Pha chống: Chân tiếp xúc mặt đất và đẩy thân robot tiến về phía trước (hoặc sang ngang).

Pha vung: Chân nhấc rời mặt đất, vung qua không trung để tiến về vị trí bước tiếp theo.

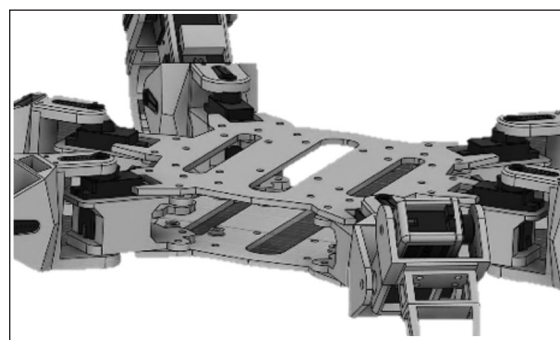
3.2.2. Hoạch định quỹ đạo chân bằng đường cong Bézier bậc 2

Phương trình tham số của đường cong Bézier bậc 2 xác định tọa độ vị trí bàn chân $P(t)=[x(t),y(t),z(t)]^T$

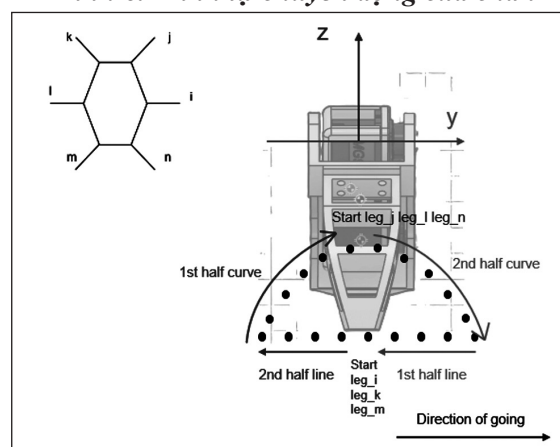
Hình 4. Mô hình chân 3-DOF trong Fusion 360



Hình 5. Kết cấu thân 2 tầng trong Fusion 360



Hình 6. Trình tự chuyển động của chân



theo biến thời gian chuẩn hóa $t \in [0,1]$ được biểu diễn như sau:

$$P(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)tP_1 + t^2 P_2, \quad t \in [0,1] \quad (11)$$

Trong đó:

$P_0(x_0, y_0, z_0)$: Điểm bắt đầu nhấc chân (cuối pha chống, bắt đầu pha vung).

$P_1(x_1, y_1, z_1)$: Điểm điều khiển, chiều cao nâng chân cực đại tại đỉnh quỹ đạo.

$P_2(x_2, y_2, z_2)$: Điểm hạ chân tiếp đất (kết thúc pha vung, chuẩn bị pha chống).

Ba điểm P_0 , P_1 và P_2 được xác định bởi ba tham số S , A và T như minh họa trong Hình 6.

Trong đó:

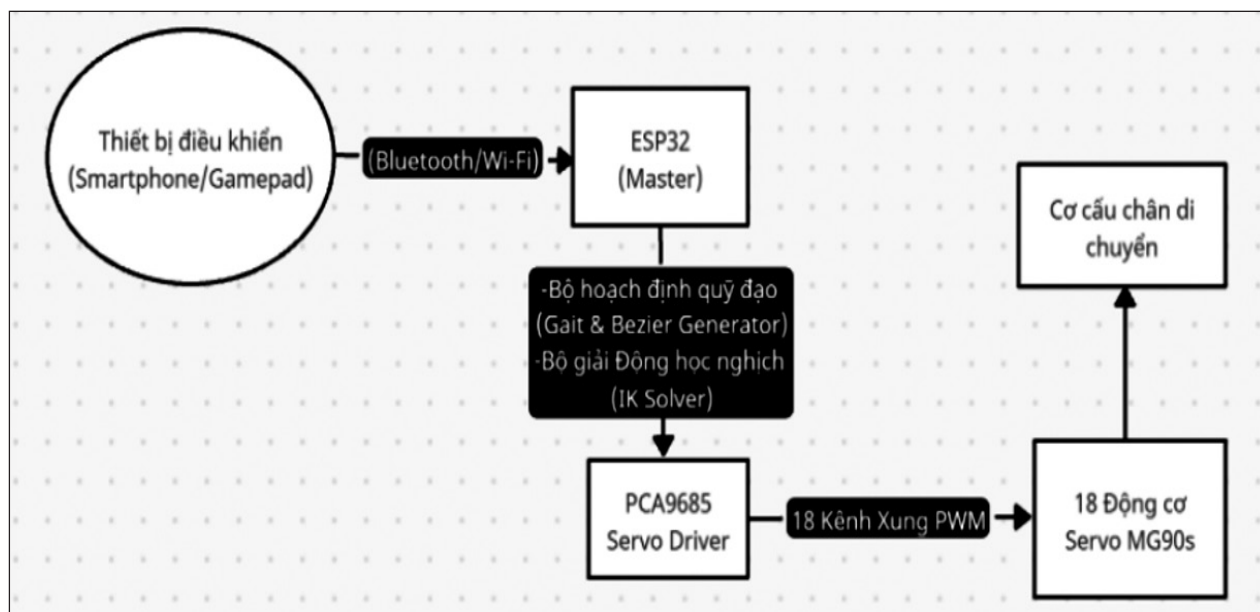
S là khoảng cách từ trục servo đến vị trí bắt đầu của pha chống.

A là độ cao nâng cực đại của bàn chân so với đường tham chiếu của pha chống.

T là khoảng cách giữa điểm đầu và điểm cuối của quỹ đạo. ($t \in [0,1]$)

3.3. Thiết kế hệ thống điều khiển

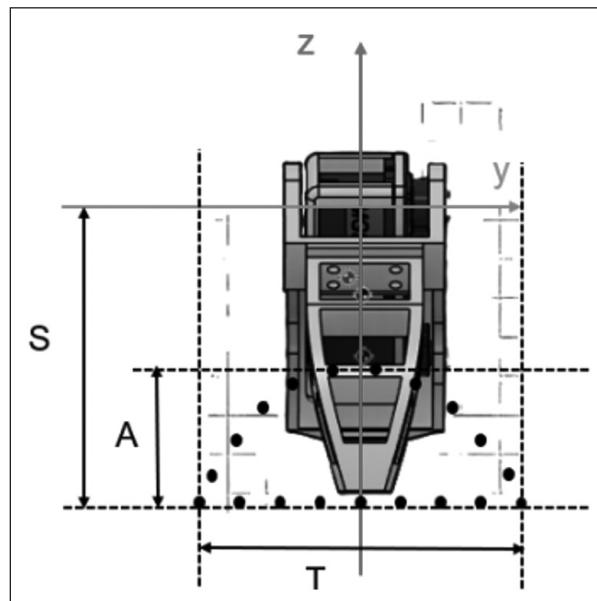
Hình 8. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển nhúng của Robot Hexapod



3.3.1. Cấu trúc phần cứng

Về mặt nguồn điện, hệ thống tách biệt mạch nguồn logic 5V cho ESP32 và mạch nguồn công suất 6V/10A cho dàn động cơ servo thông qua mạch hạ áp Buck LM2596/XL4015 từ Pin LiPo 2S (7.4V). Tụ điện hóa 2200 μF được gắn tại đầu vào nguồn PCA9685 nhằm dập dòng sụt áp đột ngột trong pha khởi động động cơ.

Hình 7. Quỹ đạo chân trong mặt phẳng O_{xy}



3.3.2. Thuật toán điều khiển trạng thái

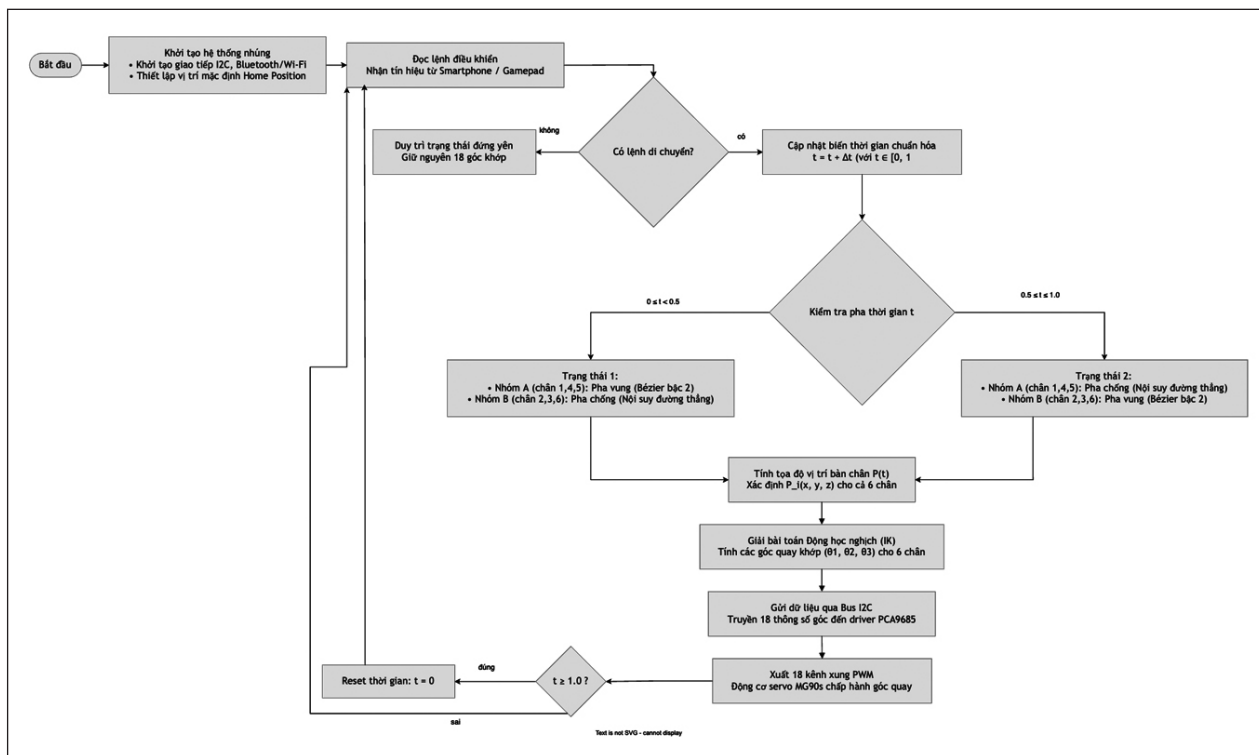
Quá trình chuyển động của 6 chân được đồng bộ hóa dựa trên biến thời gian chuẩn hóa $t \in [0,1]$ tương ứng với một chu kỳ bước đi T . Thuật toán quản lý trạng thái di chuyển của nhóm chân bên trái và bên phải được quy định cụ thể trong Bảng 3.

Bảng 3. Bảng trạng thái của nhóm chân bên trái và phải

Pha thời gian	Trạng thái nhóm trái	Trạng thái nhóm phải	Mô tả trạng thái
$t = 0 \rightarrow 0.5$	Nhấc chân (Swing phase)	Đạp đất (Stance Phase)	Nhóm A nhấc lên, di chuyển tiến về trước theo đường Bézier. Nhóm B bám đất, đẩy thân robot đi tới bằng đường thẳng.
$t = 0.5 \rightarrow 1$	Đạp đất (Stance Phase)	Nhấc chân (Swing phase)	Nhóm A hạ xuống bám đất để đẩy thân. Nhóm B nhấc lên, thực hiện bước vung để chuẩn bị cho chu kỳ tiếp theo.

Tại mỗi thời điểm tính toán Δt , thuật toán xuất ra tọa độ $P(t)=[x(t),y(t),z(t)]^T$, sau đó truyền qua bộ giải IK để cập nhật liên tục bộ thông số góc quay $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ cho từng chân.

Hình 9. Sơ đồ thuật toán điều khiển tổng quát



4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng toàn diện quy trình thiết kế sơ bộ cho robot Hexapod từ mô hình 3D CAD, tính toán động học đến kiến trúc phần cứng và thuật toán di chuyển, hướng đến việc giải quyết vấn đề di chuyển trên địa hình phức tạp mà các robot bánh xe, bánh xích đang gặp trở ngại. Cụ thể, khung thân 2 tầng đưa các linh kiện có khối lượng lớn xuống tầng dưới giúp hạ thấp trọng tâm và giảm nguy cơ lật khi

leo dốc. Việc ứng dụng phương pháp Denavit-Hartenberg cho động học thuận và phương pháp hình học phẳng cho động học nghịch đã giảm khối lượng tính toán, đáp ứng yêu cầu xử lý thời gian thực trên vi điều khiển. Sự phối hợp giữa dáng đi Tripod Gait và quỹ đạo pha vung được tạo bởi đường cong Bézier bậc 2 giúp robot chuyển động mượt mà và đạt độ cân bằng động cao ■

Lời cảm ơn:

- **Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP. Hồ Chí Minh về không gian Phòng Thí nghiệm Tính toán Cơ học.**
- **Công ty TNHH OneCad Viet Nam về Bản quyền phần mềm AutoCAD2025 và Inventor2025, Fusion 360.**

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- Deng, H., Xin, G., Zhong, G., & Mistry, M. (2017). Gait and trajectory rolling planning and control of hexapod robots for disaster rescue applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.05.007>
- Dupeyroux, J., Passault, G., Ruffier, F., Viollet, S., & Serres, J. (2017). Hexabot: A small 3D-printed six-legged walking robot designed for desert ant-like navigation tasks. Trong *Proceedings of the 20th IFAC World Congress 2017* (tr. 1628-1631). International Federation of Automatic Control. <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01643176/>
- Grzelczyk, D., Stańczyk, B., & Awrejcewicz, J. (2017). Kinematics, dynamics and power consumption analysis of the hexapod robot during walking with tripod gait. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(5), 1740010. <https://doi.org/10.1142/S0219455417400107>
- International Federation of Robotics. (2023). Executive summary: World Robotics 2023-Service Robots (11 tr.). VDMA Services GmbH. https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2023_low.pdf
- Lê Đức Thiện, Phan Vĩnh Lộc, & Nguyễn Tường Long. (2025). Xây dựng chương trình mô hình hóa robot Athlete. *Tạp chí Công Thương*, số 27, tr. 331-335.
- Liu, Y., Fan, X., Ding, L., Wang, J., Liu, T., & Gao, H. (2020). Fault-tolerant tripod gait planning and verification of a hexapod robot. *Applied Sciences*, 10(8), 2959. <https://doi.org/10.3390/app10082959>
- Market.us. (2024). Global robotics market size, share, and trends analysis report. <https://market.us/report/global-robot-market/>