

THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN NỀN TẢNG ROBOT BỐN CHÂN CHI PHÍ THẤP

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LOW-COST FOUR-LEGGED ROBOT PLATFORM

Nguyễn Minh Quân¹, Nguyễn Đại Thành¹, Trương Công Nguyên¹, Đỗ Trí Cường¹, Đặng Trí Dũng^{*1}

¹ Viện Công nghệ thông minh và tương tác, Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh

Ngày nhận: 22/06/2026 | Ngày nhận bản sửa: 09/07/2026 | Duyệt đăng: 11/07/2026

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo và triển khai một nền tảng robot bốn chân chi phí thấp phục vụ nghiên cứu về điều khiển chuyển động và khả năng di chuyển. Robot được thiết kế với cấu trúc 12 bậc tự do sử dụng động cơ chấp hành và khung cơ khí in 3D nhằm tối ưu khối lượng và độ cứng vững. Hệ thống điều khiển bao gồm NVIDIA Jetson Nano kết hợp với vi điều khiển Arduino để thực hiện điều khiển chuyển động thời gian thực. Mô hình động học thuận và động học nghịch được xây dựng nhằm tính toán quỹ đạo chân, đồng thời thuật toán sinh dáng đi trot được phát triển để phối hợp chuyển động giữa bốn chân của robot. Kết quả thực nghiệm trên robot thực cho thấy hệ thống có khả năng di chuyển ổn định trên bề mặt phẳng

Abstract

This study presents the design, fabrication, and deployment of a low-cost quadrupedal robotic platform for research on motion control and mobility. The robot is designed with a 12-degree-of-freedom structure using actuators and a 3D-printed mechanical frame to optimize mass and rigidity. The control system includes an NVIDIA Jetson Nano combined with an Arduino microcontroller for real-time motion control. Forward and inverse kinematic models are developed to calculate leg trajectories, and an algorithm for generating diagonal gait is developed to coordinate movement between the robot's four legs. Experimental results on the actual robot show that the system can move stably on a flat indoor surface at a speed of approximately 0.4 m/s

* Tác giả liên hệ.

Email: dungdt@ueh.edu.vn

Trích dẫn bài viết: Nguyễn Minh Quân, Nguyễn Đại Thành, Trương Công Nguyên, Đỗ Trí Cường, & Đặng Trí Dũng. (2026). Thiết kế và phát triển nền tảng robot bốn chân chi phí thấp. *Tạp chí Công nghệ và Thiết kế*, 1(1), 44–64.

trong nhà với tốc độ đạt khoảng 0,4 m/s. Dữ liệu thu thập từ cảm biến quán tính cho thấy robot duy trì được trạng thái cân bằng trong quá trình vận động, với các dao động thân nằm trong giới hạn chấp nhận được đối với dáng đi trot. Các kết quả đạt được chứng minh tính khả thi của thiết kế cơ khí và thuật toán điều khiển được đề xuất. Nghiên cứu cung cấp một nền tảng robot bốn chân chi phí thấp có khả năng triển khai thực tế, đồng thời tạo cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về điều khiển chuyển động, điều hướng tự hành và ứng dụng trí tuệ nhân tạo trên robot bốn chân.

Từ khóa: Robot bốn chân; robot chi phí thấp; robot có chân; robot tự hành.

Data collected from inertial sensors show that the robot maintains equilibrium during movement, with body oscillations within acceptable limits for diagonal gait. The results demonstrate the feasibility of the proposed mechanical design and control algorithm. The research provides a low-cost, practically deployable quadrupedal robot platform and lays the groundwork for further research on motion control, autonomous navigation, and artificial intelligence applications in quadrupedal robots.

Keywords: Quadruple robots; Low-cost robots; Robots with legs; Autonomous robots.

1. Tổng quan

Robot bốn chân đang trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực robot di động nhờ khả năng di chuyển linh hoạt trên các địa hình phức tạp và không cấu trúc. Tuy nhiên, các nền tảng tiên tiến hiện nay thường có chi phí cao và yêu cầu hệ thống điều khiển phức tạp, gây khó khăn cho hoạt động nghiên cứu và đào tạo.

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo và triển khai một robot bốn chân 12 bậc tự do sử dụng động cơ servo và khung cơ khí in 3D. Hệ thống điều khiển được xây dựng trên nền tảng NVIDIA Jetson Nano kết hợp với vi điều khiển Arduino. Mô hình động học thuận và động học nghịch được xây dựng nhằm tính toán quỹ đạo chuyển động của chân, đồng thời thuật toán sinh dáng đi trot được triển khai để tạo chuyển động phối hợp giữa bốn chân.

Các đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm: (1) thiết kế và chế tạo một nền tảng robot bốn chân chi phí thấp phục vụ nghiên cứu và đào tạo; (2) xây dựng mô hình động học phục vụ điều khiển chuyển động; (3) triển khai thuật toán sinh dáng đi trot trên hệ thống thực; và (4) đánh giá độ ổn định của hệ thống thông qua dữ liệu cảm biến IMU trong quá trình di chuyển.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Mục 2 trình bày các nghiên cứu liên quan. Mục 3 mô tả thiết kế phần cứng và phần mềm của hệ thống. Mục 4 trình bày kết quả thực nghiệm và đánh giá hiệu năng. Cuối cùng, Mục 5 đưa ra kết luận và định hướng phát triển trong tương lai.

2. Các nghiên cứu liên quan

Qua nhiều thập kỷ nghiên cứu về robot bốn chân, nhiều tiến bộ đáng kể đã được đạt được kể từ những đóng góp ban đầu của Raibert và cộng sự (1984, 1986) trong việc phát triển cân bằng động và điều khiển chuyển động cho robot có chân. Những tiến bộ này đã dẫn đến sự ra đời của nhiều hệ thống robot bốn chân khác nhau, chẳng hạn như BigDog (Raibert và cộng sự, 2008), ANYmal (Hutter và cộng sự, 2016) và MIT Cheetah 3 (Bledt và cộng sự, 2018). Hiệu năng của các robot bốn chân này được thể hiện qua khả năng thực hiện các chuyển động động hiệu quả trên các địa hình phức tạp.

Tuy nhiên, bất kể các hệ thống này đã đạt được nhiều thành tựu, chúng vẫn dựa vào phần cứng đặc thù, cơ cấu chuyển động với hiệu suất cao, cùng những thuật toán điều khiển

phức tạp, từ đó tăng chi phí chế tạo và duy trì hoạt động. Đơn giản là vấn đề về chi phí khiến việc tiếp cận hệ thống gặp khó khăn.

Để tăng sự tiếp cận đối với cộng đồng nghiên cứu, các nền tảng robot bốn chân với chi phí thấp đã được đưa ra trong những năm gần đây. Kim và cộng sự (2021) giới thiệu một robot bốn chân với mô hình động lực học mã nguồn mở được tạo thành từ công nghệ in 3D và linh kiện thương mại sẵn có, cho phép tiến hành các nghiên cứu liên quan đến động lực học và điều khiển chuyển động tại mức chi phí thấp. Tương tự, các nền tảng như MUTT (Graff và cộng sự, 2017), LoCoQuad (Bernal & Civera, 2020), OpenMutt (Garcia và cộng sự, 2025) và Dynamic Modular Quadruped (Kim và cộng sự, 2021) vẫn đang được phát triển để đáp ứng các yêu cầu về chi phí thấp, mô-đun và giáo dục nghiên cứu. Bên cạnh đó, Open Dynamic Robot Initiative (Grimminger và cộng sự, 2020) cung cấp một nền tảng để các nhà nghiên cứu sử dụng hệ thống robot mô-đun nhằm phát triển các thuật toán điều khiển cho robot có chân. Stanford Pupper (Kau, 2021) và HyperDog (Mudalige và cộng sự, 2022) đang giúp robot bốn chân ngày càng dễ tiếp cận hơn trong môi trường học thuật thông qua thiết kế mở và chi phí hợp lý.

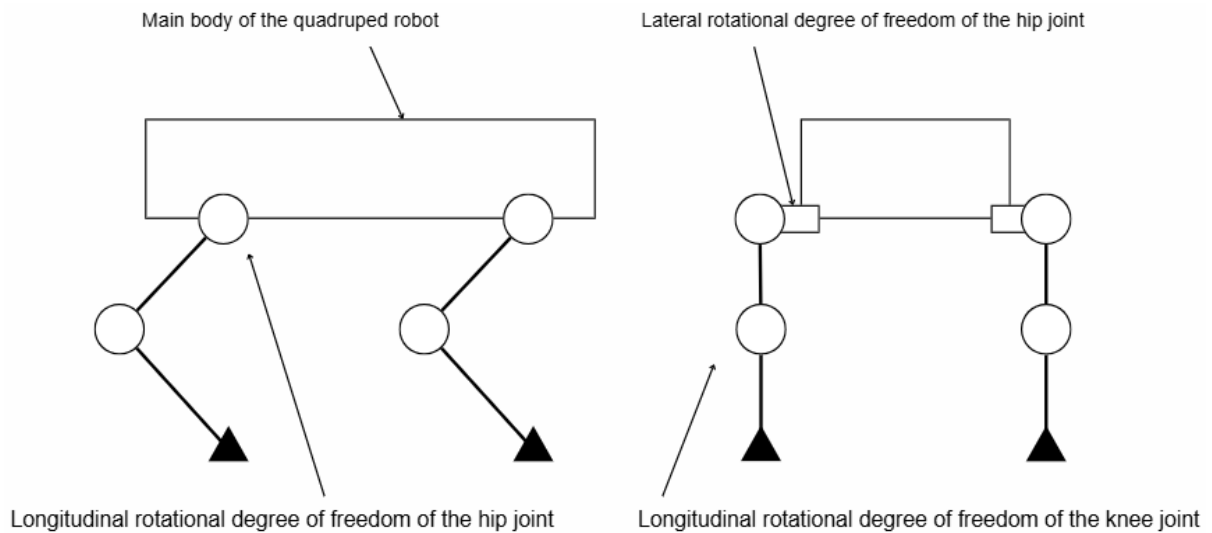
Những nghiên cứu cho thấy rằng xu hướng phát triển robot có chân theo hướng tiết kiệm chi phí, modularization và mở mã nguồn đang trở nên phổ biến. Việc sử dụng công nghệ in 3D, các linh kiện thương mại sẵn có cùng với việc sử dụng những phần mềm mã nguồn mở không chỉ giúp giảm chi phí sản xuất mà còn tạo điều kiện thuận lợi để các nhóm nghiên cứu có thể tiếp xúc với hệ thống robot có chân thực tiễn.

3. Thiết kế hệ thống

3.1. Kiến trúc cơ khí

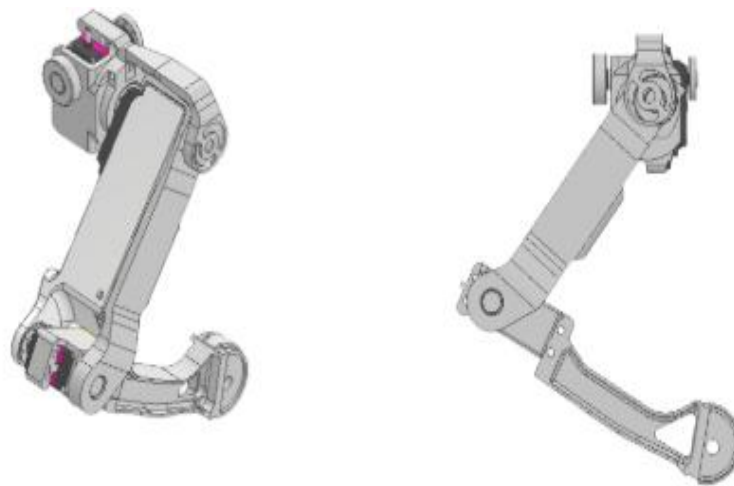
Robot bốn chân được thiết kế theo hướng tối ưu chi phí và ổn định cơ học. Khung chính dạng hộp rỗng gia cường đảm bảo độ cứng vững. Cấu trúc đối xứng hai bên giúp phân bố khối lượng đồng đều, giảm sai số dao động ảnh hưởng đến dữ liệu cảm biến.

Robot sử dụng cấu hình 12 bậc tự do, trong đó mỗi chân gồm ba khớp quay theo cấu trúc lắc ngang hông – gập duỗi hông – gập duỗi gối (Hip Roll – Hip Pitch – Knee Pitch), được bố trí theo dạng chuỗi động học nối tiếp nhằm đơn giản hóa mô hình động học và nâng cao khả năng thích nghi với địa hình không bằng phẳng.



Hình 1. Cấu hình bậc tự do (DOF) của chân robot bốn chân

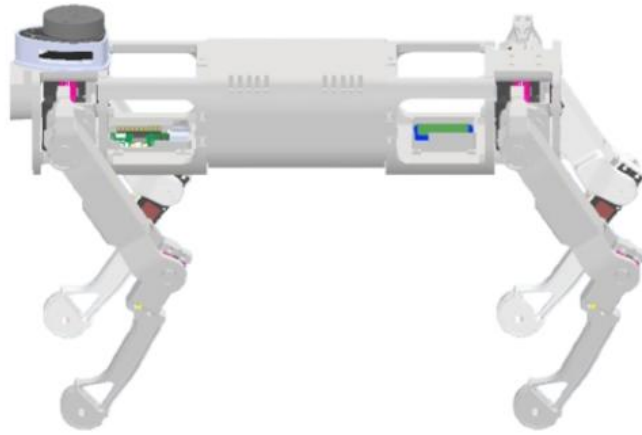
Mỗi chân gồm ba đoạn (khớp hông ngang, đùi và cẳng chân) với chiều dài đùi 220 mm, được lựa chọn nhằm cân bằng giữa vùng làm việc và mô-men tải tác dụng lên động cơ servo. Khoảng cách giữa các chân và chiều rộng thân được tối ưu để giữ trọng tâm gần tâm hình học, giúp giảm rung động trong quá trình bước đi. Các chi tiết của chân được thiết kế dạng rỗng nhằm giảm khối lượng và mô-men quán tính, đồng thời vẫn duy trì độ cứng cần thiết của kết cấu.



Hình 2. Mô hình CAD lắp ráp hoàn chỉnh của chân robot bốn chân

Vật liệu chính là nhựa PETG in 3D, được lựa chọn nhờ chi phí thấp, dễ gia công và khả năng chịu va đập tốt hơn PLA. Các vị trí chịu tải lớn như khớp hông sử dụng ổ bi 6203 để giảm ma sát và tăng độ ổn định cơ học.

Hệ thống truyền động sử dụng động cơ RC servo DS5160 gắn trực tiếp tại các khớp. Mỗi servo tích hợp sẵn bộ điều khiển vị trí và cảm biến phản hồi góc, cho phép điều khiển trực tiếp bằng tín hiệu PWM mà không cần bộ điều khiển động cơ riêng. Động cơ servo mô-men lớn được bố trí gần thân robot để giảm quán tính ở phần chân dưới.



Hình 3. Mô hình CAD tổng thể của robot bốn chân

Các thông số cơ khí chính của robot được trình bày trong Bảng 1. Robot có khối lượng khoảng 7.5 kg và sử dụng cấu trúc 12 bậc tự do nhằm đảm bảo khả năng di chuyển cơ bản trên nhiều dạng địa hình khác nhau.

Bảng 1.

Thông số cơ khí của Robot bốn chân

Thông số	Thông số kỹ thuật yêu cầu	Các nền tảng robot bốn chân thương mại và nghiên cứu tiêu biểu
Chiều dài	400 – 500 mm	400 – 700 mm
Chiều rộng	250 – 350 mm	250 – 450 mm
Chiều cao	≥ 300 mm	300 – 600 mm
Chiều dài đùi	180 – 220 mm	200 – 250 mm (ANYmal, Unitree A1, Spot)

Thông số	Thông số kỹ thuật yêu cầu	Các nền tảng robot bốn chân thương mại và nghiên cứu tiêu biểu
Khoảng cách giữa hai chân (bề rộng tư thế đứng)	250 – 380 mm	350 – 450 mm
Chiều dài vai	120 – 230 mm	125 – 250 mm
Khối lượng	10 – 15 kg	8 – 35 kg
Vật liệu	PLA+ / PETG (in 3D)	Aluminum, alloy, composite
Các khớp chính	Hip Roll, Hip Pitch, Knee Pitch	Hip Roll, Hip Pitch, Knee Pitch
Bộ truyền động	Servo	Servo hoặc Động cơ không chổi than
Vận tốc	0.2 – 1.0 m/s	0.5 – 3.0 m/s
Mức chịu tải	~1 – 3 kg	2 – 10 kg

Ghi chú. DOF = Degrees of Freedom; PETG = Polyethylene Terephthalate Glycol; PLA+ = Polylactic Acid Plus.

Để đảm bảo định hướng nền tảng chi phí thấp, hệ thống sử dụng các linh kiện phổ thông gồm động cơ servo mô-men xoắn cao, khung in 3D và máy tính nhúng nhỏ gọn NVIDIA Jetson Nano phục vụ cho việc xử lý và điều khiển robot.

3.2. Bảng kê vật tư (Bill of Materials)

Nhằm đáp ứng mục tiêu xây dựng nền tảng robot bốn chân chi phí thấp, hệ thống được thiết kế dựa trên các linh kiện thương mại phổ biến kết hợp với kết cấu cơ khí in 3D. Bảng 2 trình bày danh mục các thành phần chính và chi phí ước tính để chế tạo một robot hoàn chỉnh.

Bảng 2.

Bảng kê vật tư (BOM) của robot bốn chân

Thành phần	Thông số	Số lượng	Đơn giá ước tính (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
Nhựa in	PETG	5 kg	110.000	550.000
Máy tính nhúng	NVIDIA Jetson Nano 4GB	1	3.200.000	3.200.000
Vi điều khiển	Arduino Nano	1	180.000	180.000
Động cơ servo	DS5160 80 kg·cm	12	420.000	5.040.000
Mạch điều khiển động cơ	PCA9685 16 kênh PWM	1	120.000	120.000
Cảm biến IMU	MPU-6050	1	70.000	70.000
Camera USB	Logitech C270 HD	1	450.000	450.000
Pin động cơ	Li-ion/LiPo 8.4V 15000mAh	1	1.200.000	1.200.000
Nguồn logic	DC-DC Buck 12V → 5V	1	80.000	80.000
Bộ nguồn chính	Adapter/Battery 12V	1	350.000	350.000
Khung robot	PETG in 3D	1 bộ	1.500.000	1.500.000
Ổ bi	6203	12	35.000	420.000
Bu lông, đai ốc, miếng đệm	M3, M4 các loại	1 bộ	250.000	250.000
Dây điện, đầu nối	JST, Dupont, dây silicone	1 bộ	200.000	200.000
Mạch điện, giá lắp điện tử	PCB + giá đỡ	1 bộ	300.000	300.000
Tổng chi phí ước tính là 13.910.000 VNĐ				

Ghi chú. VNĐ = Việt Nam Đồng

Tổng chi phí chế tạo vào khoảng 13.910.000 VNĐ, trong đó chi phí chủ yếu đến từ hệ thống truyền động và máy tính nhúng. Để đánh giá tính kinh tế của nền tảng đề xuất, Bảng 3 so sánh chi phí với một số robot bốn chân mã nguồn mở tiêu biểu.

Bảng 3.

So sánh chi phí với các nền tảng robot bốn chân nghiên cứu

Nền tảng	Bậc tự do (DOF)	Bộ xử lý	Chi phí ước tính (USD)	Chi phí (VNĐ)	Mức so với đề xuất
Robot đề xuất	12	NVIDIA Jetson Nano	550	13.910.000	1,0×
Stanford Pupper	12	Raspberry Pi	1.000	26.000.000	3,7×
HyperDog	12	Raspberry Pi 4	1.500	39.000.000	2,8×
OpenMutt	12	Mini PC / SBC	2.500	65.000.000	4,7×

Ghi chú. VNĐ = Việt Nam Đồng, USD = United States Dollar tương ứng với 26.000 VNĐ (Theo thị trường quốc tế năm 2026)

Kết quả so sánh cho thấy nền tảng đề xuất đạt hiệu quả tốt về mặt chi phí, phù hợp cho các nghiên cứu và ứng dụng robot bốn chân trong môi trường học thuật.

3.3. Tính toán tải trọng và mô-men xoắn

Trong quá trình robot di chuyển, cẳng chân là bộ phận chịu tải lớn nhất do tiếp xúc trực tiếp với mặt đất. Vì vậy, mô-men tác dụng lên khớp gối được tính toán nhằm làm cơ sở lựa chọn động cơ servo và đánh giá độ bền kết cấu. Mô hình tính toán được trình bày trong Hình 4, trong đó lực tiếp xúc với mặt đất được biểu diễn bằng lực pháp tuyến F_N , bỏ qua ảnh hưởng của ma sát. Mô-men lớn nhất tác dụng lên khớp gối được xác định theo:

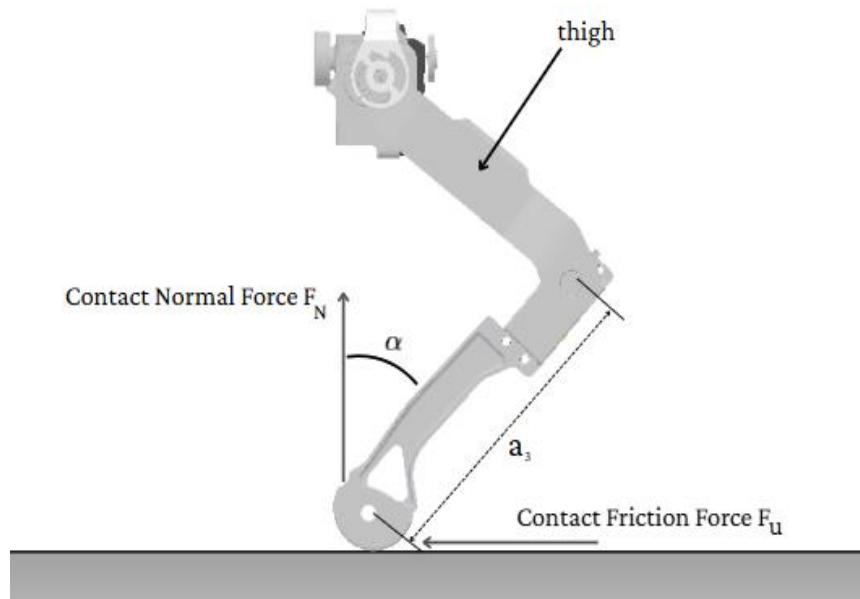
$$\tau_{max} = F_N a_3 \sin(\alpha) \eta \quad (1)$$

Trong đó F_N là lực pháp tuyến, a_3 là khoảng cách từ trục khớp gối đến điểm tiếp xúc, θ là góc nghiêng của cẳng chân và η là hệ số tải động.

Với khối lượng robot 7,5 kg, giả sử tải trọng được phân bố đều lên bốn chân, lực pháp tuyến tác dụng lên mỗi chân được xác định theo:

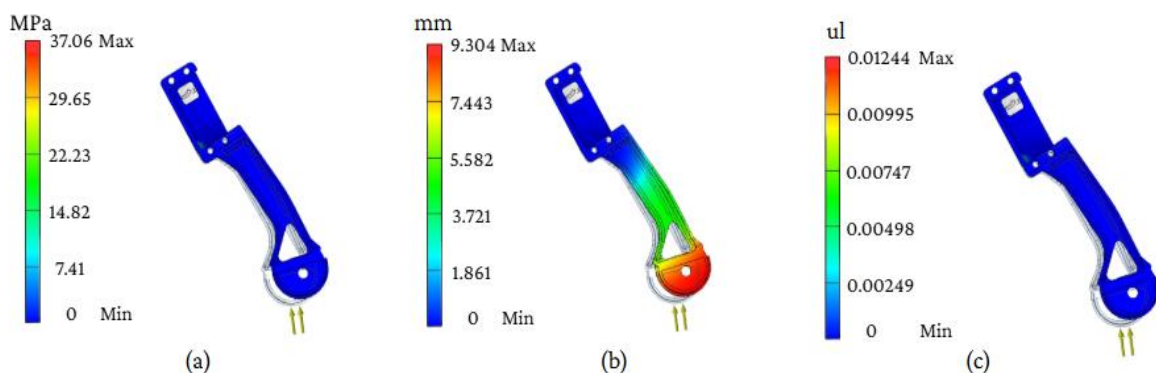
$$F_N = \frac{Mg}{4} \quad (2)$$

Kết quả tính toán cho thấy $F_N \approx 18.4 \text{ N}$. Sử dụng chiều dài cẳng chân $a_3 = 0.225 \text{ m}$, góc nghiêng $\alpha = 45^\circ$ cùng hệ số tải động, mô-men cực đại tại khớp gối được sử dụng để kiểm tra độ bền và lựa chọn động cơ servo.



Hình 4. Sơ đồ lực tác dụng lên cẳng chân của robot bốn chân khi tiếp xúc với mặt đất

Tiếp theo, cẳng chân được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm Autodesk Inventor với điều kiện tải tương ứng. Kết quả tại Hình xx cho thấy ứng suất von Mises lớn nhất khoảng 37 MPa, tập trung tại vùng khớp gối, chuyển vị cực đại khoảng 9,3 mm tại đầu bàn chân và biến dạng tương đương lớn nhất khoảng 0,012. Các giá trị này đều nằm trong giới hạn cho phép của vật liệu PETG, chứng tỏ cẳng chân đáp ứng yêu cầu về độ bền và độ cứng trong điều kiện làm việc dự kiến.



Hình 5. Kết quả phân tích phần tử hữu hạn của cẳng chân: (a) phân bố ứng suất von Mises; (b) phân bố chuyển vị tổng; (c) phân bố biến dạng tương đương

3.4. Hệ thống điện tử và xử lý dữ liệu

3.4.1. Tổng quan hệ thống

Hệ thống điều khiển được xây dựng theo kiến trúc phân cấp hai tầng gồm NVIDIA Jetson Nano và Arduino Nano. Jetson Nano đảm nhiệm các tác vụ điều khiển cấp cao như tính toán động học, sinh quỹ đạo chân và điều phối chuyển động của robot. Arduino Nano thực hiện điều khiển các động cơ servo và thu thập dữ liệu cảm biến theo thời gian thực. Kiến trúc này giúp phân tách nhiệm vụ tính toán và điều khiển, đồng thời đảm bảo khả năng vận hành ổn định của hệ thống.

3.4.2. Thiết kế hệ thống điện

Jetson Nano kết nối với camera qua USB và giao tiếp với Arduino qua chuẩn Serial. Arduino đọc dữ liệu IMU MPU6050 qua I2C và điều khiển 12 servo DS5160 thông qua mô-đun PCA9685. Hệ thống sử dụng hai nguồn riêng biệt: 5V cho mạch logic và 8.4V cho servo. Danh sách thiết bị được tổng hợp trong Bảng 4.

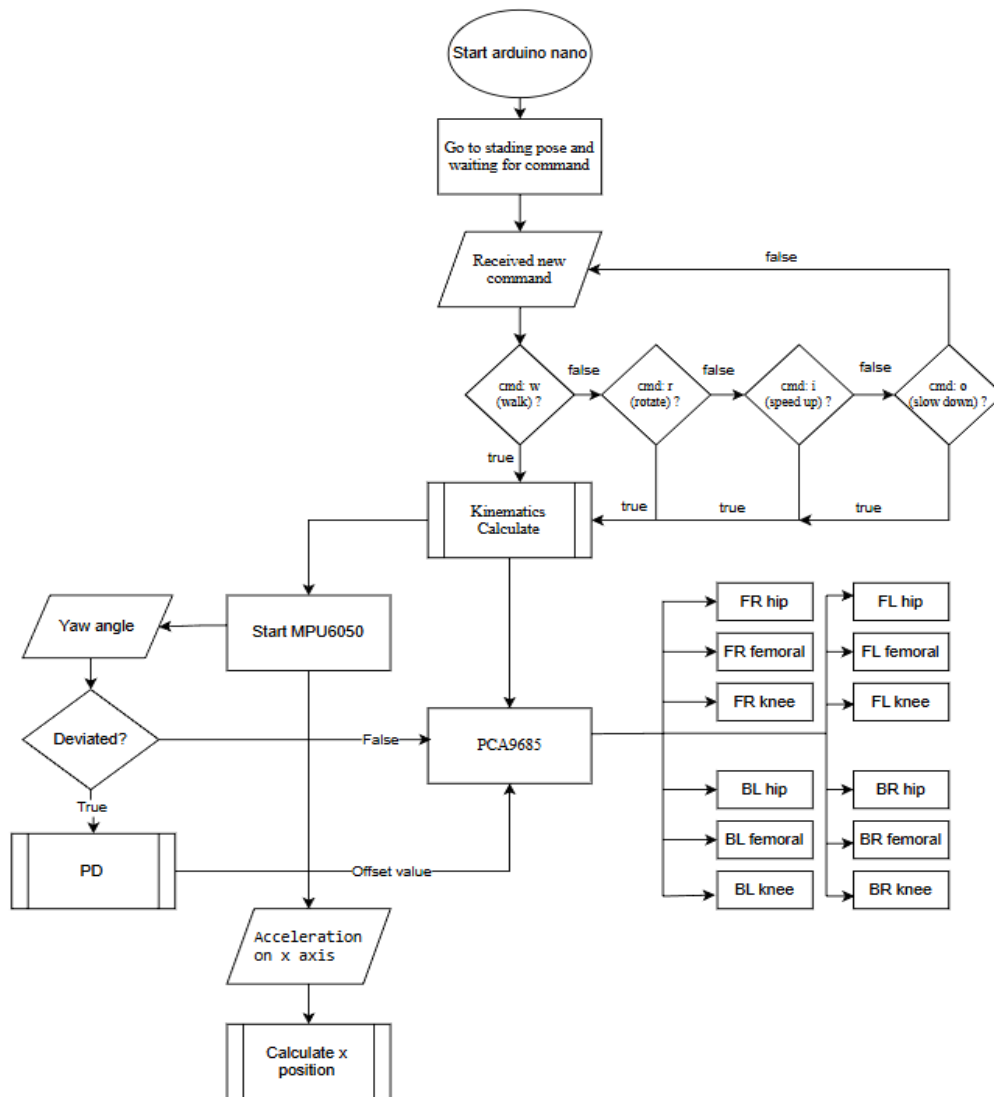
Bảng 4.

Danh sách thiết bị và máy tính nhúng dùng cho robot

Thiết bị	Thông số chính
NVIDIA Jetson Nano	ARM Cortex-A57, 4GB RAM
Logitech C270	720p, 30fps, góc nhìn 60°
MPU-6050	6-DOF IMU, giao tiếp I2C
Arduino Nano	5V, giao tiếp I2C/Serial
PCA9685	16 kênh PWM, 40–1000Hz
DS5160 Servo (×12)	80 kg·cm tại 8.4V, 180°
Pin servo	8.4V, 15000mAh
Pin logic	12V → 5V qua DC-DC Buck

Ghi chú. Thông số kỹ thuật dựa trên tài liệu của nhà sản xuất.

Chương trình điều khiển được xây dựng theo mô hình vòng lặp vô hạn nhằm duy trì quá trình điều khiển robot theo thời gian thực. Lưu đồ thuật toán được trình bày trong Hình 6.



Hình 6. Sơ đồ khối thuật toán điều khiển trên vi điều khiển

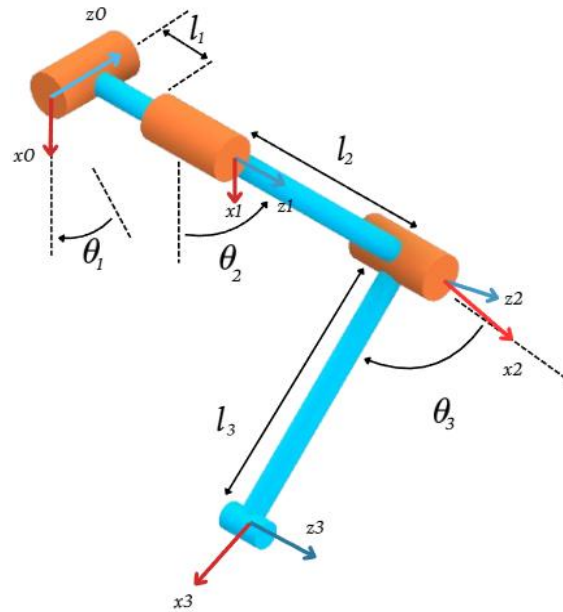
Sau khi cấp nguồn, hệ thống khởi tạo các giao tiếp I2C và UART, đồng thời đưa robot về tư thế đứng mặc định thông qua các tín hiệu PWM để đảm bảo trạng thái ổn định trước khi nhận lệnh điều khiển. Trong vòng lặp chính, vi điều khiển liên tục nhận và xử lý các lệnh điều khiển từ cổng Serial, bao gồm lệnh di chuyển thẳng (**w**), quay tại chỗ (**r**), tăng tốc độ chu kỳ bước (**i**) và giảm tốc độ (**o**). Nếu không nhận được lệnh hợp lệ, robot duy trì trạng thái chờ nhằm tránh các thao tác ngoài ý muốn.

Khi nhận được lệnh di chuyển, bộ sinh quỹ đạo tạo quỹ đạo bàn chân theo dáng đi Trot, sau đó tính toán góc các khớp thông qua mô hình động học nghịch. Đồng thời, dữ liệu từ cảm biến MPU-6050 được sử dụng làm tín hiệu phản hồi cho bộ điều khiển PID nhằm hiệu chỉnh sai lệch góc Roll và Pitch của thân robot. Các góc khớp sau khi được hiệu chỉnh được gửi đến mạch điều khiển PCA9685, từ đó phát tín hiệu PWM điều khiển 12 động cơ servo để thực hiện chuyển động của robot.

3.5. Điều khiển chuyển động cho robot bốn chân

3.5.1. Mô hình động học

Robot bốn chân được mô hình hóa theo quy ước Denavit–Hartenberg, mỗi chân gồm ba khâu : Khâu lắc ngang, khâu đuôi và khâu cẳng chân với chiều dài lần lượt là L_1 , L_2 , L_3 . Các tham số DH được tổng hợp trong Bảng 5, mô hình động học được minh họa trong Hình 7.



Hình 7. Mô hình động học roll-pitch-pitch 1 chân

Bảng 5.

Bảng tóm tắt các tham số Denavit–Hartenberg cho mô hình động học robot.

	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\frac{\pi}{2}$	L_1	θ_1
2	L_2	0	0	θ_2
3	L_3	0	0	θ_3

Bài toán động học nghịch xác định các góc khớp $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ từ vị trí mong muốn của bàn chân P_x, P_y, P_z . Đặt hai biến trung gian:

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \quad Z = P_z - L_1 \quad (3)$$

Các góc khớp lần lượt được tính như sau:

$$\theta_1 = \text{atan}\left(\frac{P_x}{P_y}\right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \text{atan}\left(\frac{Z.A - R.B}{Z.A + R.B}\right) \quad (5)$$

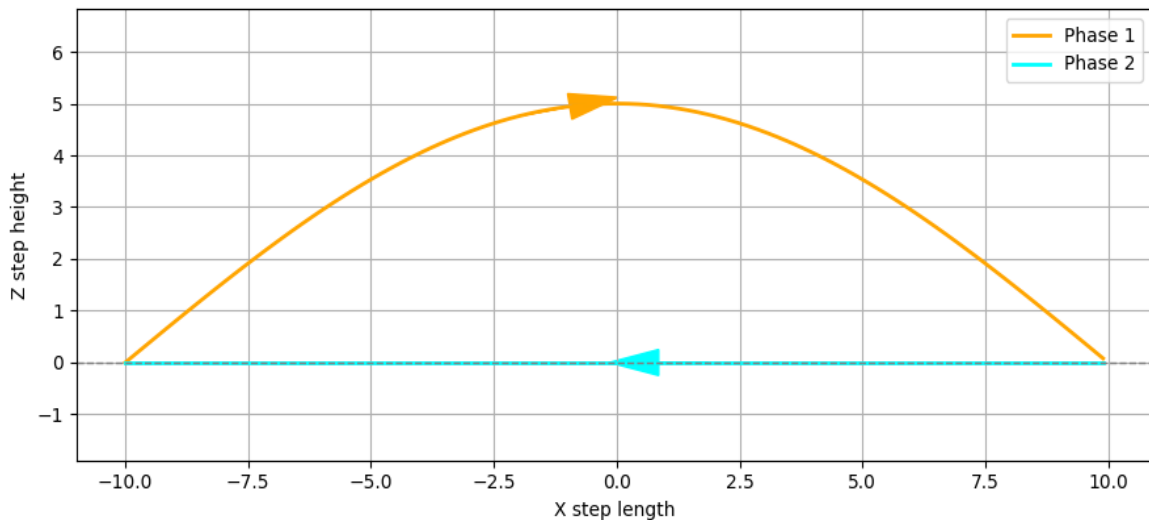
$$\theta_3 = \text{acos}\left(\frac{R^2 + Z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2.L_2.L_3}\right) \quad (6)$$

Trong đó:

$$A = L_2 + L_3.\cos(\theta_3), \quad B = L_3.\sin(\theta_3) \quad (7)$$

3.5.2. Quỹ đạo bàn chân

Quỹ đạo vận hành bàn chân được thiết kế để bảo đảm hoạt động di chuyển lặp lại và liên tục của hệ cơ khí bốn chân. Mỗi cẳng chân được kiểm soát thông qua quỹ đạo vòng trong không gian hoạt động, biểu diễn bằng thông số pha $t \in [0, 1]$ và chứa hai giai đoạn là nhấc chân và tiếp đất, như thể hiện trong Hình 8.

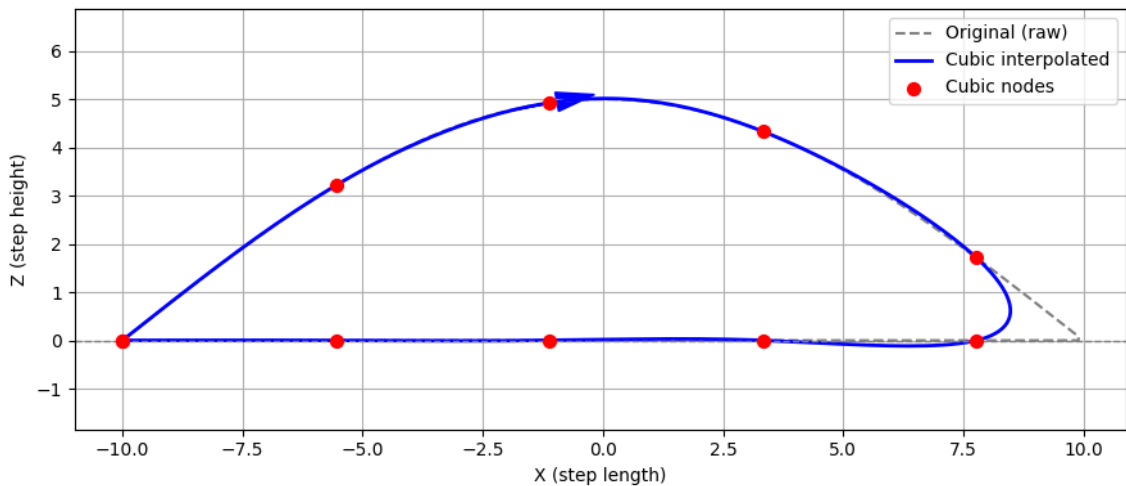


Hình 8. Quỹ đạo bàn chân trong một chu kỳ bước đi của robot bốn chân

Việc xây dựng quỹ đạo dựa trên hai yếu tố chính, đó là chiều dài bước, S và độ nâng chân H . Trong pha vung chân, bàn chân được nâng khỏi bề mặt sàn để tạo chuyển động liên tục theo một đường cong. Trong pha chống, bàn chân thực hiện chuyển động gần sát so với mặt đất và giúp đẩy robot tiến về phía trước. Vị trí bàn chân theo biến pha t được xác định bởi:

$$(length(t), height(t)) = \begin{cases} \frac{S}{2}(4t-1), H\sin(2\pi t) & 0 \leq t < 0.5 \\ \frac{S}{2}(3-4t), 0 & 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

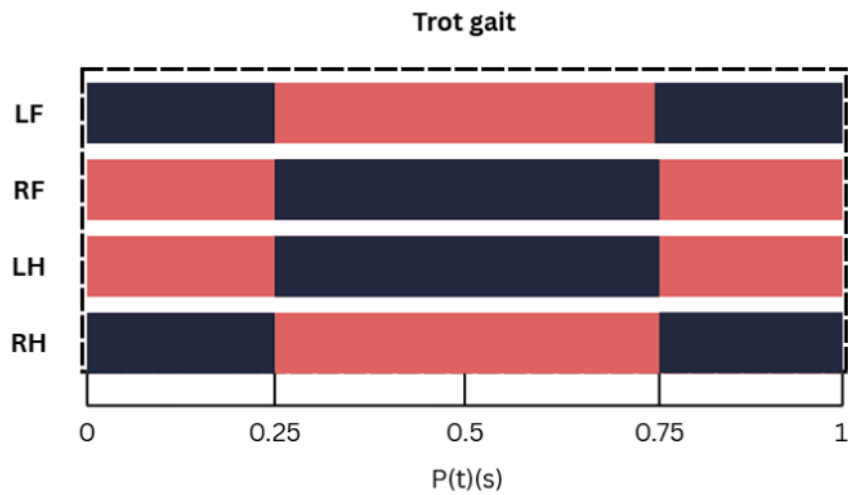
Một đường spline được khớp qua tập các điểm điều khiển để thu được quỹ đạo của bàn chân. Kỹ thuật nội suy Catmull-Rom được sử dụng cho mục đích này. Phương pháp này tạo ra một quỹ đạo bàn chân mượt mà, đảm bảo tính liên tục của chuyển động cũng như sự chuyển tiếp êm giữa vận tốc và gia tốc của bàn chân trong toàn bộ chu kỳ dáng đi.



Hình 9. Quỹ đạo bàn chân sau khi nội suy bằng spline bậc ba (Cubic Interpolation)

3.5.3. Dáng đi trot

Khi robot bước đi, hai bước khác nhau mà chân của robot trải qua trong mỗi chu kỳ bước đi bao gồm bước chống đỡ khi chân tiếp xúc với mặt đất, và bước đánh khi chân đó được nâng cao và đưa ra phía trước. Dáng Trot giúp robot luôn duy trì ít nhất hai chân tiếp đất trong bất kỳ thời điểm nào bằng cách điều khiển hai chân đối diện (LF-RH và RF-LH) di chuyển cùng pha lệch là một nửa chu kỳ.



Hình 10. Biểu đồ thời gian pha nhắc chân và tiếp đất của dáng đi Trot

4. Kết quả

4.1. Kết quả chế tạo robot

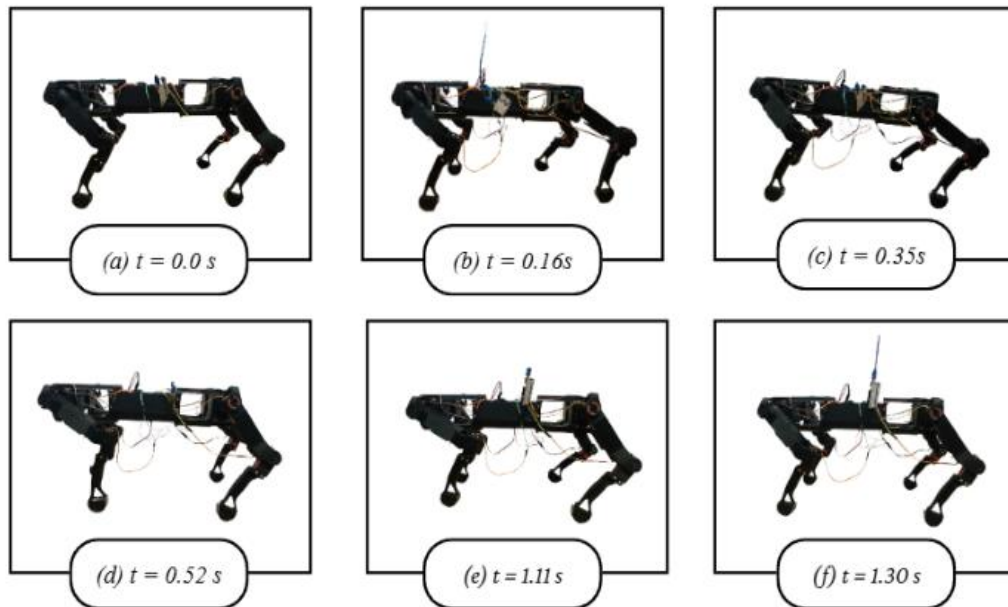
Để đánh giá khả năng di chuyển và độ ổn định của robot, các thử nghiệm đã được thực hiện trên một robot bốn chân hoàn chỉnh. Hình 8 thể hiện robot thực nghiệm từ góc nhìn phía trước và bên cạnh. Các thử nghiệm này được tiến hành trong phòng trên bề mặt phẳng. Trong quá trình thử nghiệm, robot được cho di chuyển bằng dáng đi xiên với các tham số dáng đi được thiết lập sẵn. Dữ liệu IMU được thu thập để phân tích độ ổn định thân robot theo các góc nghiêng ngang và góc roll.



Hình 11. (a) góc nhìn phía trước của robot thực; (b) góc nhìn phía bên của robot thực

4.2. Kết quả thực nghiệm dáng đi trot

Thử nghiệm bao gồm chế độ đi trot của robot trên bề mặt phẳng trong nhà. Sơ đồ bên dưới thể hiện các pha chuyển động, trong đó hai chân đối diện theo đường trot (LF-RH và RF-LH) lần lượt nhấc lên và chạm đất theo mẫu pha chuyển động.

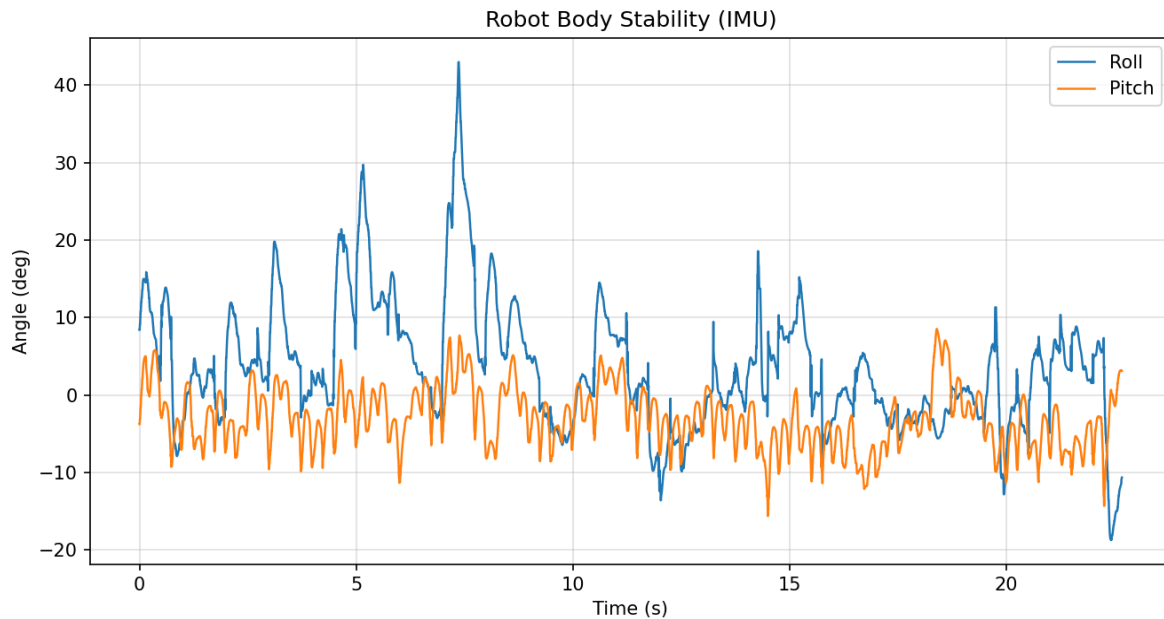


Hình 12. Kết quả thực nghiệm dáng đi trot của robot có chân tại các thời điểm khác nhau

Vận tốc di chuyển trung bình được xác định bằng cách đo trực tiếp quãng đường, trong đó quãng đường s bằng 2m, còn thời gian t cần để đi hết quãng đường đó là 5s. Trong quá trình di chuyển cũng xuất hiện hiện tượng trượt nhẹ, có thể do hệ số ma sát giữa đầu bàn chân và bề mặt sàn trong nhà thấp. Các cải tiến có thể thực hiện trong các thí nghiệm tiếp theo bao gồm tích hợp phản hồi lực tiếp xúc hoặc sử dụng vật liệu khác cho đầu bàn chân.

4.3. Đánh giá dao động thân robot trong quá trình di chuyển

Để xem xét về khả năng duy trì sự ổn định của robot khi di chuyển, các số liệu từ cảm biến IMU đã được thu thập liên tục qua toàn bộ quá trình thực hiện tư thế trot. Góc Roll và Pitch của robot đã được tính toán từ số liệu quaternion và biểu diễn dưới dạng thời gian. Kết quả được thể hiện ở Hình 13 dưới đây.



Hình 13. Biến thiên góc Roll và Pitch của thân robot trong quá trình thực hiện dáng đi trot

Kết quả cho thấy góc pitch dao động trong khoảng từ $-15,63^\circ$ đến $8,51^\circ$, với giá trị RMS bằng $4,90^\circ$, cho thấy dao động tương đối nhỏ theo phương dọc, tuy có xu hướng lệch nhẹ về phía âm. Trong khi đó, góc roll dao động trong khoảng rộng hơn đáng kể, từ $-18,75^\circ$ đến $43,00^\circ$, với giá trị RMS bằng $8,88^\circ$. Biên độ roll đạt đỉnh $43,00^\circ$ là mức tương đối lớn đối với một robot bốn chân đang di chuyển, cho thấy hệ vẫn còn dao động lắc ngang đáng kể tại một số thời điểm, đặc biệt khi có sự thay đổi trong điều kiện di chuyển hoặc chuyển pha bước đi.

Trong lần thử nghiệm này, robot không xảy ra hiện tượng mất ổn định hoàn toàn hay té ngã các dao động biên độ lớn chỉ xuất hiện trong khoảng thời gian ngắn rồi robot cân bằng trở lại và tiếp tục di chuyển. Kết quả này bước đầu cho thấy thuật toán tạo dáng đi trot kết hợp với cấu trúc cơ khí có khả năng hỗ trợ duy trì cân bằng động học ở một mức độ nhất định. Tuy nhiên, do biên độ roll cực đại còn khá lớn và thí nghiệm mới được thực hiện trên một điều kiện mặt sàn nhất định, kết luận về độ ổn định tổng thể của hệ thống cần được xem là kết quả bước đầu, và roll vẫn là hướng cần cải thiện trong các nghiên cứu tiếp theo. Các chỉ số đánh giá cụ thể được trình bày trong Bảng 6 dưới đây.

Bảng 6.

Các chỉ số đánh giá độ ổn định của robot từ dữ liệu IMU.

Chỉ số	Roll (deg)	Pitch (deg)
RMS	8,88 deg	4,90
Biên độ dao động cực đại	43,00	15,63
Range (Min–Max)	-18,75→43,00	-15,63→8,51

4.4. Thảo luận và Hạn chế

Kết luận từ thí nghiệm cho thấy máy có thể đi trot trên một mặt phẳng ổn định. Những con số của thông số Roll và Pitch luôn nằm trong phạm vi cho phép, điều đó chứng tỏ thuật toán tạo dáng đi cùng kết cấu máy phù hợp với yêu cầu căn bản của việc di chuyển.

Thế nhưng, ở một số pha chuyển tiếp hay thay đổi hướng di chuyển, góc Roll sẽ cho thấy những biên độ dao động tương đối lớn. Điều này cũng chứng tỏ rằng hệ thống vẫn đang chịu ảnh hưởng từ sự dịch chuyển trọng tâm và đặc tính tiếp xúc của các chân robot với mặt đất. Đáng chú ý hơn, tham số gait hiện đang được điều chỉnh ở mức cố định nên khả năng thích ứng với các điều kiện vận hành khác nhau vẫn còn hạn chế.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, một robot bốn chân đã được thiết kế, chế tạo và áp dụng thành công với khả năng di chuyển bằng dáng trot. Một mô hình động học chân đã được xây dựng để ước lượng đường đi của các khớp, bên cạnh việc áp dụng thuật toán sinh dáng đi để tạo sự phối hợp di chuyển của bốn chân của robot.

Để đánh giá tính khả thi của hệ thống, robot được sử dụng trong thí nghiệm được chế tạo bằng các thành phần phần cứng thực tế và được kiểm thử trong các điều kiện vận hành gần với thực tế. Các kết quả thực nghiệm cho thấy robot có thể di chuyển ổn định trên mặt phẳng và duy trì cân bằng trong quá trình chuyển động. Ngoài ra, các góc roll và pitch đo được từ IMU cũng nằm trong phạm vi chấp nhận được. Do đó, nghiên cứu đã xác nhận tính khả thi của cả thiết kế cơ khí và thuật toán tạo dáng đi trot.

Các mục tiêu đã đề ra của bài báo đã được hoàn thành, bao gồm thiết kế và chế tạo robot bốn chân, xây dựng mô hình động học, phát triển thuật toán tạo dáng đi trot, và đánh giá

khả năng vận hành của robot thông qua thực nghiệm. Các kết quả thu được sẽ đóng vai trò làm cơ sở cho những nghiên cứu trong tương lai.

6. Hướng nghiên cứu trong tương lai

Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tiếp tục hoàn thiện nền tảng robot theo hướng nâng cao khả năng tự hành và đánh giá toàn diện hiệu năng của hệ thống. Trước hết, hệ thống định vị trực quan-quán tính sẽ được tích hợp sâu hơn với các thuật toán điều hướng và SLAM nhằm đánh giá sai số bám quỹ đạo, độ chính xác định vị và khả năng di chuyển tự chủ trong các môi trường thực tế.

Bên cạnh đó, các chỉ tiêu đánh giá hiệu năng của robot sẽ được mở rộng, bao gồm mức tiêu thụ năng lượng, thời gian hoạt động trong một chu kỳ sạc, khả năng mang tải, khả năng vượt chướng ngại, di chuyển trên nhiều loại địa hình và xác định độ dốc tối đa mà robot có thể vượt qua. Những đánh giá này sẽ giúp hoàn thiện cơ sở định lượng để so sánh với các nền tảng robot bốn chân hiện có.

Ngoài dáng đi trot được sử dụng trong nghiên cứu này, các dáng đi khác như crawl, pace và các chiến lược chuyển động thích nghi sẽ được triển khai nhằm nâng cao khả năng ổn định và tính linh hoạt trong các điều kiện vận hành khác nhau. Đồng thời, các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung đánh giá sai số bám quỹ đạo của bàn chân, độ chính xác điều khiển của các khớp ở nhiều tốc độ chuyển động, cũng như so sánh định lượng với các nền tảng robot bốn chân chi phí thấp khác để đánh giá toàn diện hiệu quả của hệ thống được đề xuất.

Tài liệu tham khảo

- Bernal, M., & Civera, J. (2020). *LoCoQuad: A low-cost arachnoid quadruped robot for research and education* (arXiv:2003.09025). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09025>
- Bledt, G., Powell, M. J., Katz, B., Di Carlo, J., Wensing, P. M., & Kim, S. (2018). MIT Cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2245–2252). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593885>
- Garcia, M. R., Walck, C., Gonzalez, B., Niemiec, J., Alkire, G., Deets, A., Nadeau, Z., & Hockley, C. (2025). OpenMutt: A reconfigurable quadruped robot for research and education. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 53(4), 942–956. <https://doi.org/10.1177/03064190241263575>

- Graff, J., Martinez, A., Maynard, K., & Bittle, A. (2017). *Low cost quadruped: MUTT* [Major Qualifying Project, Worcester Polytechnic Institute]. Digital WPI. https://digital.wpi.edu/concern/student_works/mg74qn58t
- Grimminger, F., Meduri, A., Khadiv, M., Viereck, J., Wüthrich, M., Naveau, M., Berenz, V., Heim, S., Widmaier, F., Flayols, T., Fiene, J., Badri-Spröwitz, A., & Righetti, L. (2020). An open torque-controlled modular robot architecture for legged locomotion research. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3650–3657. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2976639>
- Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Fankhauser, P., Bloesch, M., Diethelm, R., Bachmann, S., Melzer, A., & Hoepflinger, M. (2016). ANYmal – A highly mobile and dynamic quadrupedal robot. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 38–44). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7758092>
- Kau, N. (2021). *Stanford Pupper: A low-cost agile quadruped robot for benchmarking and education* (arXiv:2110.00736). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.00736>
- Kim, J., Kang, T., Song, D., & Yi, S.-J. (2021). Design and control of a open-source, low cost, 3D printed dynamic quadruped robot. *Applied Sciences*, 11(9), Article 3762. <https://doi.org/10.3390/app11093762>
- Mudalige, N. D. W., Zhura, I., Babataev, I., Nazarova, E., Fedoseev, A., & Tsetserukou, D. (2022). HyperDog: An open-source quadruped robot platform based on ROS2 and micro-ROS. In *2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 436–441). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC53654.2022.9945526>
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., & Playter, R. (2008). BigDog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 10822–10825. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833>
- Raibert, M. H., Brown, H. B., Jr., & Chepponis, M. (1984). Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine. *The International Journal of Robotics Research*, 3(2), 75–92. <https://doi.org/10.1177/027836498400300207>
- Raibert, M., Chepponis, M., & Brown, H. B., Jr. (1986). Running on four legs as though they were one. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(2), 70–82. <https://doi.org/10.1109/JRA.1986.1087044>