

THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN ROBOT CÂN BẰNG BÓNG TRÊN MẶT PHẲNG

Huỳnh Long, Nguyễn Văn Đạt*, Nguyễn Chấn Huy

Viện Kỹ Thuật, Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh.

*Tác giả liên hệ: (Điện thoại: 0337141342; Email: datnvan.021504@gmail.com)

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế, mô hình hóa, mô phỏng và thực nghiệm một hệ thống robot cân bằng bóng trên mặt phẳng sử dụng cơ cấu song song Stewart với 6 servo. Hệ thống cho phép điều khiển mặt phẳng nghiêng theo hai trục X và Y để đưa quả bóng về vị trí mong muốn. Do đặc tính phi tuyến và phức tạp của cơ cấu Stewart, việc điều khiển đòi hỏi độ chính xác cao. Trong đề tài, các thuật toán điều khiển PD và PD Fuzzy được áp dụng trong môi trường MATLAB/Simulink để phân tích và tối ưu phản ứng của hệ thống. Camera gắn phía trên đóng vai trò cảm biến thị giác, xác định tọa độ bóng và truyền dữ liệu về hệ điều khiển qua LabVIEW kết hợp Arduino. Tín hiệu điều khiển được tính toán và gửi tới các servo để điều chỉnh độ nghiêng mặt phẳng. Quá trình mô phỏng được thực hiện trước nhằm kiểm tra khả năng đáp ứng của thuật toán, sau đó triển khai thực nghiệm để đánh giá tính ứng dụng và hiệu quả điều khiển trên mô hình thực.

Từ khóa: Arduino, Cơ cấu Stewart; Điều khiển mờ, Mô phỏng MATLAB/Simulink.

I. Tổng quan

Bài toán cân bằng vật thể trên một bề mặt chuyển động là một chủ đề nhận được nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực điều khiển tự động và robot học, vì nó đại diện cho một lớp các hệ thống điều khiển phi tuyến, bất ổn định và có nhiều biến đầu vào – đầu ra. Nếu như mô hình con lắc ngược là ví dụ kinh điển để nghiên cứu lý thuyết điều khiển, thì hệ thống robot cân bằng bóng trên mặt phẳng lại mang tính ứng dụng thực tiễn cao hơn, đặc biệt trong các lĩnh vực như điều khiển cơ cấu song song, robot dẫn đường, và thị giác máy tính.

Trong khuôn khổ đề tài này, một hệ thống robot sử dụng cơ cấu Stewart (6 bậc tự do) được thiết kế và chế tạo, trong đó sáu servo được gắn từ đế lên mặt phẳng phía trên theo cấu hình song song. Cơ cấu cho phép điều khiển góc nghiêng của mặt phẳng theo hai trục X và Y một cách chính xác. Một camera được tích hợp để xác định vị trí quả bóng trên mặt phẳng theo thời gian thực, phục vụ cho vòng lặp phản hồi trong điều khiển.

Mục tiêu chính của hệ thống là điều khiển quả bóng trên mặt phẳng di chuyển theo yêu cầu, cụ thể gồm ba bài toán chính: Cân bằng bóng tại vị trí trung tâm mặt phẳng, dẫn bóng tới một vị trí chỉ định, điều khiển bóng di chuyển theo một quỹ đạo đã định trước.

II. Phương Pháp

1. Thiết kế hệ thống

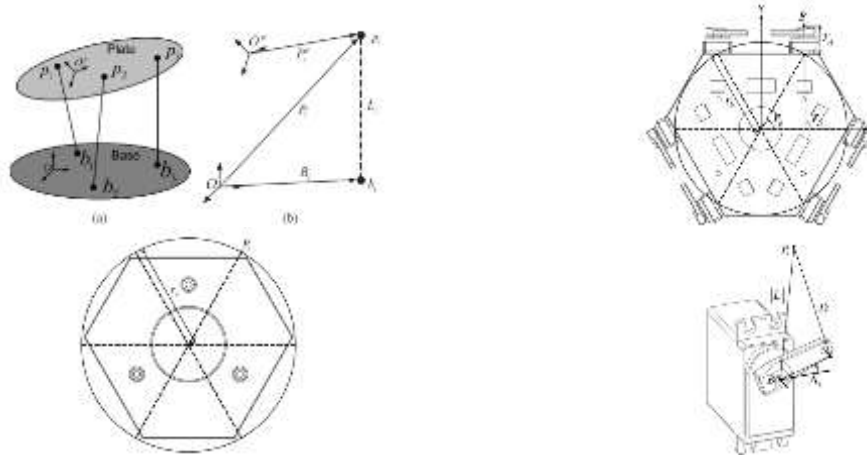
1.1. Cấu trúc cơ khí



Hình 1. Stewart Platform

Hệ thống cơ khí sử dụng cơ cấu Stewart platform 6 bậc tự do (hexapod) với mặt phẳng vuông 30×30 cm chế tạo bằng công nghệ in 3D, nhẹ và cứng vững. Mặt phẳng liên kết với khung qua sáu thanh nối có đầu bi cầu, cho phép chuyển động linh hoạt. Sáu servo gắn trên khung điều khiển độc lập chiều dài các thanh, giúp mặt phẳng nghiêng theo trục X, Y hoặc kết hợp, đồng thời nâng hạ theo trục Z với độ chính xác cao. Cấu hình này mô phỏng chính xác mặt phẳng nghiêng để điều khiển quỹ đạo quả bóng trong không gian ba chiều và hỗ trợ triển khai thuật toán điều khiển nâng cao.

1.2. Hệ thống điều khiển



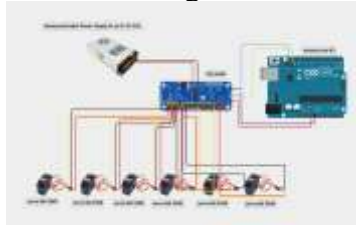
Hình 2. Sơ đồ minh họa hệ thống Stewart gồm tọa độ hệ thống và các vector.

Hệ thống điều khiển được thiết kế theo mô hình phân tán, kết hợp giữa xử lý ảnh, điều khiển nhúng và tính toán thời gian thực nhằm đảm bảo khả năng dẫn hướng quả bóng chính xác trên mặt phẳng.

Camera gắn phía trên thu hình toàn bộ khu vực làm việc và truyền dữ liệu về máy tính. Ảnh được xử lý bằng thư viện OpenCV để lọc màu, phát hiện biên và xác định tọa độ trung tâm quả bóng trong hệ trục (X, Y).

Dữ liệu tọa độ sau đó được gửi đến Arduino Mega, đóng vai trò là bộ trung gian điều khiển phần cứng. Arduino tiếp nhận tín hiệu điều khiển từ máy tính và xuất xung điều khiển tới 6 servo qua UART.

Trên máy tính, các thuật toán điều khiển PD và PD Fuzzy được triển khai trong môi trường MATLAB và LabVIEW. Dựa trên sai số vị trí giữa bóng và điểm đích, thuật toán tính toán góc nghiêng cần thiết quanh hai trục X, Y. Góc nghiêng được chuyển đổi thành độ dài các thanh truyền động để điều khiển cơ cấu Stewart một cách đồng bộ và chính xác.



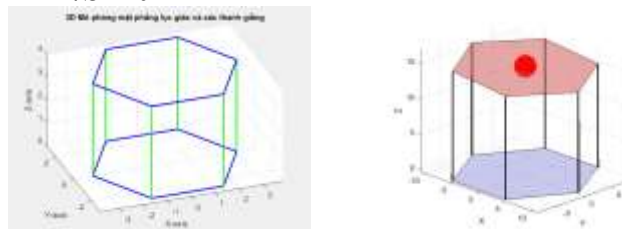
Hình 3. Sơ đồ mạch cho điều khiển động cơ của mô hình

2. Mô hình hóa và mô phỏng

2.1. Thuật toán điều khiển

Hệ thống sử dụng hai chiến lược điều khiển chính: **PD tuyến tính** và **PD mờ**. Bộ điều khiển PD điều chỉnh góc nghiêng mặt phẳng dựa trên sai số vị trí giữa bóng và mục tiêu, trong đó thành phần P phản ứng nhanh theo sai số tức thời, còn thành phần D giúp giảm dao động. Trong khi đó, **PD mờ** kết hợp logic mờ với cấu trúc PD truyền thống để cải thiện hiệu suất trong môi trường phi tuyến hoặc có nhiễu, nhờ khả năng điều khiển thích nghi theo sai số và đạo hàm sai số, từ đó tăng độ ổn định và giảm độ trễ của hệ thống.

2.2. Mô phỏng MATLAB/Simulink



Hình 4. Mô phỏng biểu diễn cấu trúc và chuyển động của mô hình

Quá trình mô phỏng được thực hiện trong MATLAB/Simulink nhằm xây dựng và kiểm nghiệm hệ thống điều khiển bóng trên mặt phẳng nghiêng. Mô hình động học của bóng được thiết lập dựa trên phương trình chuyển động dưới tác dụng của trọng lực, với gia tốc theo trục X và Y phụ thuộc vào góc nghiêng mặt phẳng (θ_x, θ_y). Vận tốc và vị trí bóng được tính bằng tích phân cấp 1 và cấp 2 theo thời gian. Hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển **PD tuyến tính** và **PD mờ (Fuzzy PD)**. Từ sai số vị trí giữa bóng và điểm mục tiêu, bộ điều khiển tính toán góc nghiêng mặt phẳng cần thiết. Các góc nghiêng sau đó được chuyển đổi thành độ dài tương ứng của sáu chân servo bằng thuật toán nghịch động học Stewart. Mô phỏng được thực hiện với nhiều vị trí khởi tạo khác nhau của bóng. Các thông số đánh giá gồm:

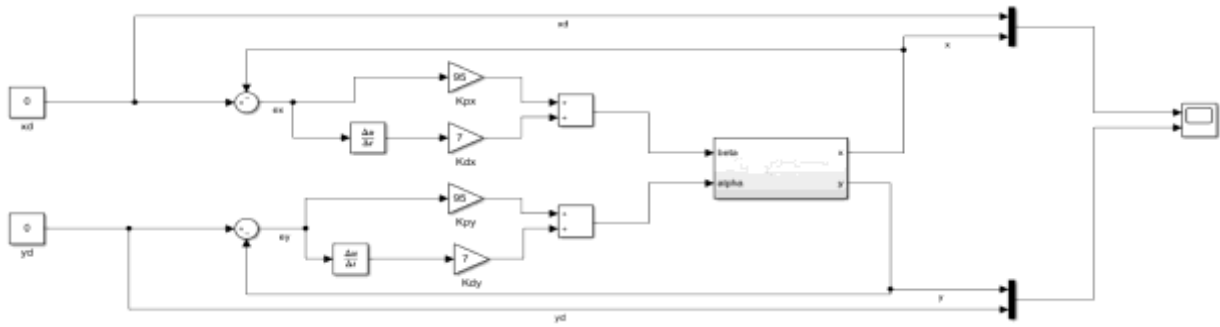
- **Thời gian hội tụ:** thời gian để bóng ổn định trong vùng bán kính cho phép quanh mục tiêu.
- **Dao động dư:** mức dao động còn lại khi bóng gần đạt vị trí mong muốn.
- **Độ nhạy với nhiễu:** đánh giá khi thêm nhiễu vị trí và nhiễu cảm biến trong quá trình mô phỏng.

Quá trình mô phỏng giúp phân tích hiệu quả điều khiển trong cả điều kiện lý tưởng và có nhiễu, hỗ trợ tối ưu thuật toán trước khi triển khai thực nghiệm.

Trước khi mô phỏng, cần thiết lập phương trình vi phân mô tả hệ thống, trong đó góc nghiêng mặt phẳng là đầu vào, vị trí bóng là đầu ra. Ta quy ước x và y chính là tọa độ của quả bóng trên mặt phẳng động hay mặt phẳng chứa quả bóng theo chiều ngang và chiều dọc trong hệ tọa độ, m là khối lượng của quả bóng, I là moment quán tính của quả bóng, r là bán kính của quả bóng, g là gia tốc trọng trường, α là góc của mặt phẳng khi xoay quanh trục x và β là góc của mặt phẳng xoay quanh trục y, và moment quán tính $I = \frac{2}{5}mr^2$ đối với vật thể hình cầu đặc và $I = \frac{2}{3}mr^2$ đối với vật thể hình cầu rỗng, trong bài báo này sử dụng công thức moment quán tính đối với vật thể hình cầu rỗng để có thể dễ dàng thiết kế bộ điều khiển khi thực nghiệm. Tuy nhiên phương trình trên là phương trình phi tuyến tính và gây khó khăn trong việc thiết kế bộ điều khiển nên có thể xem góc lệch của mặt phẳng động là không quá lớn nên từ đó có thể quy công thức về dạng tuyến tính như sau:

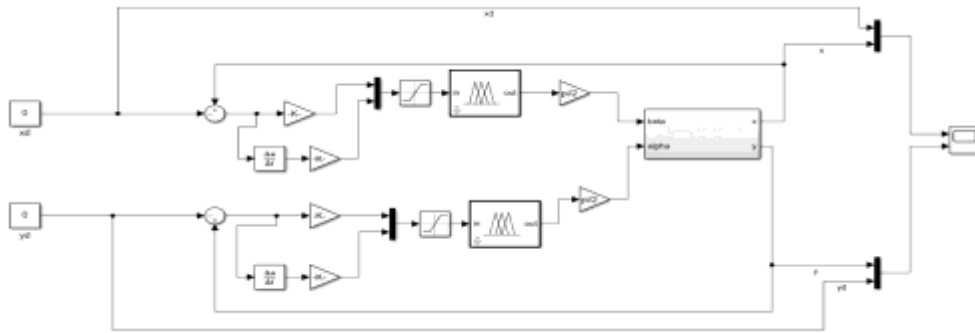
$$\ddot{x}_b = \frac{1}{m_b + I_b/r_b^2}(m_b g \beta)$$

$$\ddot{y}_b = \frac{1}{m_b + I_b/r_b^2}(m_b g \alpha)$$



Hình 5: Sơ đồ mô phỏng dùng PD Controller

Hình 5 là sơ đồ kết nối mô phỏng matlab simulink dùng bộ điều khiển PD, cách kết nối các khối là đầu ra của hệ thống là x và y là tọa độ của quả bóng, và đầu vào là góc lệch của mặt phẳng, đầu ra được phản hồi về và tính toán sai số với $e = \text{setpoint} - \text{feedback}$, sau đó áp dụng công thức của bộ điều khiển PID nhưng trong bài báo này sử dụng PD nên I được xem như bằng không $PD = e \cdot Kp + \frac{de}{dt} \cdot Kd$, đầu ra này sẽ được đưa vào hệ thống và điều chỉnh α và β khiến quả bóng về vị trí mong muốn, và tham số Kp và Kd được chọn trong bài báo này là 95 và 7.



Hình 6: Sơ đồ mô phỏng dùng Fuzzy Controller

Hình 6 mô tả hệ thống ball and plate dùng bộ điều khiển Fuzzy, về cơ bản thì giống với cấu trúc mô phỏng hệ thống ball and plate dùng bộ điều khiển PD nhưng cách tính sai số có một chút thay đổi với $e = \text{feedback} - \text{setpoint}$, và sai số với đạo hàm của sai số được chuẩn hóa trước khi dùng bộ điều khiển fuzzy, bởi vì sai số tối đa của quả bóng theo vị trí là từ 0 m đến 0.25 m và biến thiên sai số được chọn trong bài báo này là 2.44 m/s nên giá trị được chuẩn hóa được tính theo công thức $e \cdot \frac{1}{0.25}$ và $e \cdot \frac{1}{2.44}$ và giá trị khuếch đại của các góc sau khi được tính toán từ bộ điều khiển fuzzy thì sẽ được nhân với $\frac{\pi}{2}$ vì giá trị góc lệch tối đa được chọn từ $-\frac{\pi}{4}$ rad đến $\frac{\pi}{4}$ rad.

III. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô phỏng



Hình 7. Kết quả mô phỏng đáp ứng hệ thống

Hình bên trái là kết quả mô phỏng đáp ứng của bộ điều khiển PD và hình bên phải là fuzzy, có thể thấy rằng thời gian đáp ứng vị trí mong muốn của bộ điều khiển PD là vượt trội so với

bộ điều khiển fuzzy đối với hệ thống ball and plate trong bài báo này, thời gian quá độ của bộ điều khiển PD là khoảng 0.3 giây trong khi bộ điều khiển fuzzy là khoảng 21 giây và có một ít vọt lố không quá đáng kể.

3.2. Kết quả triển khai mô hình

3.2.1. Chế tạo mô hình thực



Hình 8. Hình ảnh mô hình thực tế sau khi hoàn thiện

Mô hình thực tế được chế tạo từ các vật liệu dễ gia công, bao gồm khung nhôm định hình làm giá đỡ cố định và mặt phẳng làm bằng tấm mica trong suốt có kích thước $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$. Sáu động cơ servo loại MG996R được gắn vào khung và nối với mặt phẳng thông qua các thanh liên kết gắn bi cầu, tạo thành cơ cấu Stewart Platform với 6 bậc tự do. Các linh kiện điện tử bao gồm Arduino Mega 2560, nguồn cấp servo, mạch chia nguồn và camera USB được lắp ráp và bố trí gọn gàng trên hệ thống. Giao tiếp giữa máy tính và Arduino được thiết lập qua cổng nối tiếp (Serial) với tốc độ baud 115200, cho phép trao đổi dữ liệu điều khiển và cảm biến theo thời gian thực.

5. Kết luận và hướng phát triển

Trong khuôn khổ đề tài, nhóm đã thiết kế và mô phỏng thành công hệ thống robot cân bằng bóng sử dụng cơ cấu Stewart, kết hợp giữa mô hình động học, thuật toán điều khiển (giữa PD và PD Fuzzy) trong đó điều khiển PD cho thấy khả năng đáp ứng nhanh và hiệu quả hơn trong việc ổn định và điều khiển bóng về vị trí mục tiêu một cách hiệu quả.

Tuy nhiên, do thời gian nghiên cứu còn hạn chế, việc hiện thực hóa việc điều khiển trên hệ thống vật lý chưa được thực hiện. Trong tương lai, nhóm dự kiến hoàn thiện phần cứng, kết nối thời gian thực và thử nghiệm thực tế nhằm đánh giá toàn diện hiệu quả điều khiển cũng như mở rộng ứng dụng sang các bài toán điều khiển phức tạp hơn như cân bằng đa vật thể hoặc học tăng cường.

6. Tài liệu tham khảo:

- [1] Federico Dal Cero (2021). *Ball and Plate MPC Control of a 6 DOF Stewart Platform*.
- [2] Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot Modeling and Control*.
- [3] MathWorks. (n.d.). *Ball-on-Plate Control Using MATLAB and Simulink*