

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ HỆ ĐIỀU KHIỂN CÂN BẰNG CHO THIẾT BỊ BẮT BẮM MỤC TIÊU

RESEARCH AND DESIGN OF LEVELING CONTROL SYSTEM FOR TARGET TRACKING EQUIPMENT

Nguyễn Ngọc Kiên^{1,*}, Hà Mạnh Tuấn², Nguyễn Công Chiến³

¹Khoa Cơ khí chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Công ty TNHH một thành viên Công nghệ và Thương mại Wiinvent

³Khoa Cơ điện tử, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email liên hệ: kien.nguyenngoc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu và thiết kế hệ điều khiển cân bằng tự động cho thiết bị bắt bám mục tiêu (radar) đặt trên khung bệ di động. Để đảm bảo độ chính xác cho đường ngắm trong quá trình trinh sát, sàn xe mang đài bắt bám cần được duy trì ở trạng thái thăng bằng tuyệt đối, vuông góc với phương trọng trường. Nghiên cứu tiến hành mô hình hóa động học và động lực học của hệ thống sàn xe sử dụng cơ cấu 4 chân chống dạng vít me đai ốc bi. Để giải quyết bài toán siêu tĩnh do hệ có 3 phương trình cân bằng nhưng có tới 4 ẩn số lực tại các chân, tác giả đã ứng dụng thành công ma trận giả nghịch đảo Moore-Penrose nhằm tối ưu hóa phân bố lực. Toàn bộ quy trình điều khiển được thực thi trên vi điều khiển Arduino, kết hợp thuật toán PID và tín hiệu phản hồi từ cảm biến nghiêng IMU cùng hệ thống động cơ Servo truyền động. Kết quả thiết kế làm tiền đề quan trọng để tiến tới mô phỏng, chế tạo và ứng dụng thực tiễn trên các khí tài quân sự.

Từ khóa: Thiết bị bắt bám mục tiêu; Cân bằng sàn xe; Trục vít me đai ốc bi; Ma trận giả nghịch đảo Moore-Penrose; Điều khiển PID.

ABSTRACT

This article focuses on the research and design of an automatic leveling control system for target tracking equipment (radar) mounted on a mobile platform. To ensure line-of-sight accuracy during reconnaissance, the vehicle's platform carrying the tracking station must be maintained in an absolutely level state, perpendicular to the direction of gravity. The study models the kinematics and dynamics of the platform system using a 4-leg structure with ball screw mechanisms. To solve the statically indeterminate problem – where the system has 3 equilibrium equations but 4 unknown reaction forces at the legs – the author successfully applies the Moore-Penrose pseudo-inverse matrix for optimal force distribution. The entire control process is executed on an Arduino microcontroller, integrating a PID algorithm, feedback signals from an IMU tilt sensor, and a Servo motor drive system. The design results serve as a crucial foundation for subsequent simulation, manufacturing, and practical application in military equipment.

Keywords: Target tracking equipment; Platform leveling; Ball screw; Moore-Penrose pseudo-inverse matrix; PID control.

1. NGHIÊN CỨU, MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CÂN BẰNG CHO THIẾT BỊ BẮM BẮM MỤC TIÊU

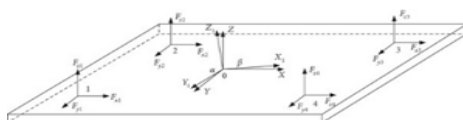
1.1. Giới thiệu về hệ thống cân bằng thiết bị bắt bám mục tiêu

Trong lĩnh vực quân sự và trinh sát, thiết bị bắt bám mục tiêu đóng vai trò cốt lõi trong việc theo dõi và định vị. Một trong những yêu cầu khắt khe nhất để duy trì độ chính xác của tín hiệu (góc tã và góc phương vị) là trục quay của đài phải luôn đồng phương với lực trọng trường của Trái Đất.

Tuy nhiên, khi triển khai ở các địa hình thực tế với độ dốc dao động từ 0° đến 5° , mặt phẳng chứa thiết bị thường bị nghiêng (gây ra sai số góc Roll và Pitch). Để khắc phục điều này, thiết bị được trang bị hệ thống nâng hạ và cân bằng gồm 4 chân chống chịu tải, cho phép tự động hiệu chỉnh và giữ thăng bằng cho đài radar trước khi đi vào hoạt động. Bài báo này sẽ đi sâu vào việc giải quyết mô hình toán học và xây dựng thuật toán điều khiển vị trí – lực cho 4 chân chống nói trên. Điểm mới của nghiên cứu là ứng dụng ma trận giả nghịch đảo Moore-Penrose để giải bài toán phân bổ lực siêu tĩnh (4 ẩn, 3 phương trình), kết hợp bộ điều khiển PID số trên vi điều khiển Arduino và cảm biến IMU – một giải pháp phù hợp với yêu cầu thực tiễn về chi phí và khả năng triển khai nhanh trên khí tài quân sự.

1.2. Mô hình hóa động học và động lực học hệ thống cân bằng

1.2.1. Động học thiết bị bắt bám mục tiêu



Hình 1. Mô hình hóa sàn xe thiết bị bắt bám mục tiêu

Tọa độ của bốn chân trong hệ cố định:

$$C_1^{(0)} = (x_1, y_1, z_1)^T$$

$$C_2^{(0)} = (x_2, y_2, z_2)^T$$

$$C_3^{(0)} = (x_3, y_3, z_3)^T$$

$$C_4^{(0)} = (x_4, y_4, z_4)^T$$

Ma trận quay:

$$\text{Rot}(X, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(Y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Để đo độ cân bằng của sàn xe, cảm biến độ nghiêng trực tiếp được lắp ở tâm sàn chịu lực, có thể phát hiện góc nghiêng α và β của sàn chịu lực và truyền góc nghiêng đến bộ điều khiển cân bằng [1]. Lấy điểm cao nhất làm điểm tham chiếu, bộ điều khiển có thể tính toán độ chênh lệch độ cao giữa điểm cao nhất và ba điểm còn lại theo hướng thẳng đứng [2, 3]. Nếu hệ tọa độ sàn so với hệ tọa độ tham chiếu trước tiên quay α quanh trục y, sau đó quay β quanh trục x, có thể thu được ma trận biến đổi tọa độ T như sau:

$$T_1 = \text{Rot}(X, \alpha) \cdot \text{Rot}(Y, \beta)$$

Tương tự như vậy, nếu hệ tọa độ nền tảng đầu tiên quay β quanh trục y, sau đó quay α quanh trục x, thì ma trận biến đổi của hệ tọa độ sẽ là:

$$T_2 = \text{Rot}(Y, \beta) \cdot \text{Rot}(X, \alpha)$$

Với hai tổ hợp góc quay như trên, có thể tính theo T_1 hoặc T_2 . Nhưng ở đây, tác giả tính toán dựa trên ma trận T_1 để đưa ra công thức tính độ dịch chuyển các chân.

Xác định tọa độ bốn chân trong hệ bằng công thức [5]:

$$C_i^{(1)} = T_1 \cdot C_i^{(0)} \quad (\text{với } i = 1, 2, 3, 4)$$

Phân tích các góc quay α và β cho thấy:

- Khi $\alpha > 0$ và $\beta > 0$: Điểm 3 là cao nhất, điểm 1 là thấp nhất.
- Khi $\alpha > 0$ và $\beta < 0$: Điểm 2 là cao nhất, điểm 4 là thấp nhất.
- Khi $\alpha < 0$ và $\beta > 0$: Điểm 4 là cao nhất, điểm 2 là thấp nhất.
- Khi $\alpha < 0$ và $\beta < 0$: Điểm 1 là cao nhất, điểm 3 là thấp nhất.
- Khi $\alpha = 0$ và $\beta = 0$: Sàn nằm ngang.

Độ chênh lệch độ cao giữa điểm cao nhất và các điểm khác có thể thu được theo phương trình:

$$\begin{aligned} \Delta z_i &= z_{\max} - z_i \\ &= -\sin(\beta) \cdot (x_{\max} - x_i) + \sin(\alpha) \cdot (y_{\max} - y_i) \end{aligned}$$

1.2.2. Động lực học và bài toán phân bố lực

Thiết bị bắt bám mục tiêu được chia thành nhiều cụm thành phần nhỏ, có khối tâm phân bố rải khắp trên thiết bị [4], tuy nhiên có thể coi cả thiết bị là một vật thể duy nhất với khối tâm được tính theo công thức:

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \\ y_G &= \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} \\ z_G &= \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i} \end{aligned}$$

Vị trí khối tâm được tính:

$$G = (x_G, y_G, z_G)$$

Trong đó:

- m_i : Khối lượng của từng phần hệ thống;
- (x_i, y_i, z_i) : Tọa độ khối tâm của từng phần;
- (x_G, y_G, z_G) : Tọa độ khối tâm tổng hợp.

Với phần động học đã đặt hệ tọa độ gốc Oxyz tại giao điểm đường chéo của 4 chân vít me. Tọa độ khối tâm G được tính dựa vào gốc Oxyz.

Qua đây thu được một khối duy nhất có trọng lượng $W = m \cdot g$ tác dụng tại điểm G [4].

Tọa độ của 4 chân đối với gốc tọa độ:

$$C_1 = \left(\frac{-L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0 \right)$$

$$C_2 = \left(\frac{-L_x}{2}, \frac{-L_y}{2}, 0 \right)$$

$$C_3 = \left(\frac{L_x}{2}, \frac{-L_y}{2}, 0 \right)$$

$$C_4 = \left(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, 0 \right)$$

Bài toán động lực học đưa ra với thông số đầu vào:

- Tọa độ của 4 chân chống của hệ;
- Góc nghiêng sàn xe;
- Trọng tâm của xe.

Tọa độ trọng tâm G khi sàn bị nghiêng:

$$G' = T_1 \cdot G$$

Khi sàn bị nghiêng, cần điều chỉnh vít me để đưa sàn xe về vị trí cân bằng ban đầu.

Phương trình cân bằng lực và momen:

Cân bằng lực theo phương Z:

$$\sum F_Z = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = W$$

Cân bằng momen quanh trục X (gây bởi độ nghiêng α):

$$\sum M_X = (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \cdot \frac{L_y}{2} = W \cdot y'_G$$

Cân bằng momen quanh trục Y (gây bởi độ nghiêng β):

$$\sum M_Y = (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \cdot \frac{L_x}{2} = W \cdot x'_G$$

Trong bài toán được đưa ra, hệ phương trình cân bằng lực và momen có 3 phương trình nhưng có 4 ẩn số (lực tại 4 chân F_1, F_2, F_3, F_4). Điều này khiến hệ phương trình bị thừa số ẩn, dẫn đến việc không thể giải trực tiếp bằng phương pháp thông thường. Để giải hệ phương trình thiếu điều kiện ràng buộc, ta sử dụng ma trận giả nghịch đảo (Moore-Penrose Pseudo-Inverse) để tìm nghiệm tốt nhất theo nghĩa bình phương tối thiểu.

Ma trận giả nghịch đảo, còn được biết đến với tên gọi ma trận nghịch đảo Moore-Penrose, là một khái niệm quan trọng trong đại số tuyến tính. Ma trận này được sử dụng để tìm nghịch đảo của các ma trận không vuông hoặc không khả nghịch. Ma trận giả nghịch đảo được giải bằng phương pháp SVD (phân tích giá trị kì dị) - một trong những phương pháp hiệu quả nhất để tính toán ma trận giả nghịch đảo.

Từ phương pháp trên, tác giả đã tính được bộ thông số tải trọng tác dụng lên từng chân kích như sau:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{4} \left(W + \frac{2 \cdot W \cdot y'_G}{L_y} + \frac{2 \cdot W \cdot x'_G}{L_x} \right) \\ F_2 = \frac{1}{4} \left(W + \frac{2 \cdot W \cdot y'_G}{L_y} - \frac{2 \cdot W \cdot x'_G}{L_x} \right) \\ F_3 = \frac{1}{4} \left(W - \frac{2 \cdot W \cdot y'_G}{L_y} + \frac{2 \cdot W \cdot x'_G}{L_x} \right) \\ F_4 = \frac{1}{4} \left(W - \frac{2 \cdot W \cdot y'_G}{L_y} - \frac{2 \cdot W \cdot x'_G}{L_x} \right) \end{cases}$$

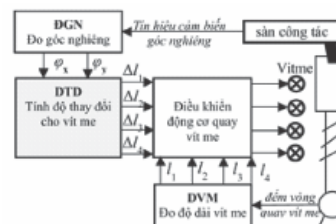
2. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG CÂN BẰNG

Một hệ thống muốn hoạt động ổn định, thì bộ điều khiển đóng vai trò rất quan trọng. Nó có vai trò như bộ não, trung tâm điều khiển, giúp hệ thống xử lý các tín hiệu đo về từ thực tế sau đó hiệu chỉnh xuất tín hiệu ngõ ra phù hợp với set point đặt vào bộ điều khiển. Trên thực tế, có rất nhiều bộ điều khiển như bộ điều khiển trượt, bộ điều khiển LQR, bộ điều khiển LQG, bộ điều khiển PID... Tùy thuộc vào mô hình hệ thống và yêu cầu mà để lựa chọn bộ điều khiển sao cho phù hợp và giải quyết được bài toán đặt ra tối ưu nhất. Mỗi bộ điều khiển đều có ưu/nhược điểm riêng, ở đây tác giả xét về bộ điều khiển PID số [6].

2.1. Nguyên lý điều khiển cân bằng thiết bị bám bắt mục tiêu

Trước tiên, ta xem sàn xe như một mặt phẳng, được điều khiển cân bằng dựa vào bốn chân kích được đặt tại bốn góc của sàn.

Mô hình cân bằng sàn xe hoạt động dựa trên nguyên lý cân bằng góc nghiêng Roll và Pitch của 4 chân kích dạng vít me đai ốc bi được truyền động bằng động cơ servo. Khi sàn xe bị nghiêng bên trái, 4 chân kích sẽ được điều chỉnh để kéo thiết bị nghiêng ngược lại, quay trở lại cân bằng. Trường hợp sàn xe nghiêng về phía trước, 4 chân kích sẽ được điều chỉnh để dài bất bám có xu hướng nghiêng ngược về sau để đạt trạng thái cân bằng [7].



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý điều khiển cân bằng

Giai đoạn đo nghiêng:

- Cảm biến nghiêng (IMU) đặt trên sàn xe đo độ nghiêng theo hai trục ngang (pitch, roll).
- Vi điều khiển nhận dữ liệu góc nghiêng và xác định cần nâng/hạ góc nào.

Tính toán điều khiển:

- Bộ điều khiển tính toán chiều cao cần điều chỉnh tại từng chân để đưa sàn về trạng thái cân bằng (góc nghiêng = 0).
- Dùng các thuật toán như: PID, điều khiển mờ, hoặc bảng tra (lookup table) đơn giản.

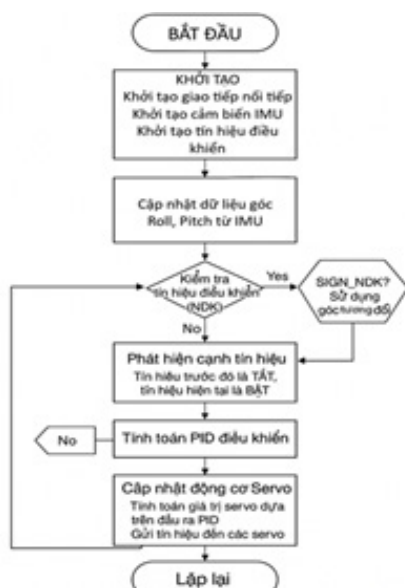
Vận hành mô tơ vít me:

- Điều khiển từng động cơ quay trục vít me → nâng/hạ từng đai ốc tại chân.
- Khi trục vít quay, đai ốc dịch chuyển thẳng đứng.

Kiểm tra phản hồi và hiệu chỉnh:

- Cảm biến đo liên tục → nếu vẫn lệch → tiếp tục điều chỉnh vì sai tại các chân.
- Khi góc nghiêng < sai số cho phép → kết thúc quá trình.

2.2. Thuật toán điều khiển cân bằng thiết bị bất bảm mục tiêu



Hình 3. Thuật toán điều khiển cân bằng thiết bị bất bảm mục tiêu

Sau khi cấp nguồn, bộ điều khiển trung tâm được kích hoạt. Bộ điều khiển trung tâm thực hiện kiểm tra tín hiệu kết nối với nguồn điều khiển và cảm biến IMU. Nếu tín hiệu điều khiển được kích hoạt (SIGN_NDK), hệ thống sử dụng góc tương đối làm tham chiếu cân bằng, nếu là tín hiệu (SIGN_NDK_ABS), hệ thống sẽ sử dụng góc tuyệt đối làm tham chiếu cân bằng.

Bộ điều khiển đọc giá trị từ cảm biến IMU, thu thông tin về các góc Roll và Pitch. Dựa trên dữ liệu đọc được từ cảm biến, bộ điều khiển thực hiện tính toán các giá trị PID.

Bộ điều khiển xuất xung PWM được tính từ giá trị PID tới các Driver để điều khiển động cơ. Servo được điều khiển để tạo phản hồi vật lý giúp hệ thống lấy lại cân bằng.

Chu trình được lặp lại sau mỗi 10 ms để đảm bảo phản ứng kịp thời với các thay đổi của hệ thống.

Ở đây, có hai trường hợp xử lý góc của mặt phẳng nghiêng:

- Trường hợp 1: Khi sàn xe được đặt trên bề mặt đất phẳng, sàn xe song song với mặt đất, góc tương đối Roll và Pitch đọc từ cảm biến sẽ là 0. Khi đó, nếu mặt phẳng sàn xe bằng phẳng, góc tương đối đọc từ cảm biến sẽ là 0. Ta chọn trường hợp này khi bãi đỗ hoặc mặt phẳng đặt thiết bị tương đối bằng phẳng so với mặt đất.

- Trường hợp 2: Sàn xe đặt trên bất kỳ mặt phẳng nào, góc tuyệt đối thu được là góc định hướng của IMU so với hệ quy chiếu cố định toàn cục – hay còn gọi là hướng nghiêng thực tế của thiết bị so với trọng trường cố định của Trái Đất. Áp dụng trong trường hợp khi bãi đỗ hoặc mặt phẳng đặt thiết bị không bằng

phẳng so với mặt đất (hay được hiểu là không vuông góc so với trọng lực của Trái Đất).

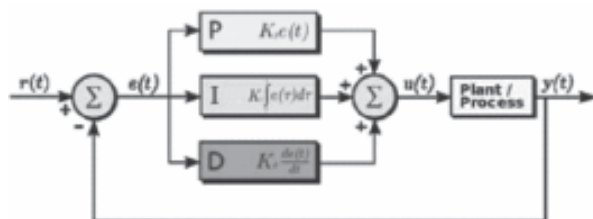
Lưu đồ hiển thị quá trình từ khi cấp nguồn cho đến khi bộ điều khiển thực hiện các chức năng kiểm tra, đọc dữ liệu từ cảm biến, tính toán giá trị PID và cuối cùng là xuất xung PWM để điều khiển các động cơ thông qua biến tần.

2.3. Tổng quan thuật toán điều khiển PID

Bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative) là một trong những phương pháp điều khiển phản hồi phổ biến nhất trong công nghiệp và tự động hóa nhờ cấu trúc đơn giản, dễ chỉnh định và hiệu quả cao trong nhiều lớp đối tượng điều khiển tuyến tính [6]. Trong bài báo này, PID sẽ được lựa chọn để điều khiển vị trí các chân kích do yêu cầu thời gian thực, độ chính xác cao và khả năng tích hợp trực tiếp trên vi điều khiển Arduino.

Giá trị đo được sẽ được áp dụng vào bộ điều khiển tương ứng. Bộ điều khiển nhận tín hiệu đầu vào từ khối cảm biến IMU và tín hiệu điều khiển. Bộ PID tính toán xung PWM để điều chỉnh tốc độ động cơ servo, từ đó điều khiển các cơ cấu vít me tại các chân kích nhằm đưa sàn xe về trạng thái cân bằng.

Giải thuật PID có sơ đồ khối vòng kín như hình 4:



Hình 4. Bộ điều khiển PID

Trong đó:

- $r(t)$: Điểm đặt;
- $u(t)$: Tín hiệu điều khiển;
- $y(t)$: Tín hiệu đo từ hệ thống;
- $e(t) = r(t) - y(t)$: Sai số giữa giá trị điểm đặt và tín hiệu đo.

Phương trình tín hiệu của bộ điều khiển PID:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Trong đó:

- K_p – Độ lợi tỉ lệ;
- K_i – Độ lợi tích phân;
- K_d – Độ lợi đạo hàm.

Các tham số K_p , K_i , K_d sẽ ứng với các khâu như khâu tỉ lệ, khâu tích phân và khâu vi phân của bộ điều khiển PID. Thành phần tỉ lệ $u(t) = K_p \cdot e(t)$ đóng vai trò quyết định tốc độ đáp ứng; K_p lớn giúp hệ đáp ứng nhanh nhưng dễ gây dao động và vọt lố. Thành phần tích phân $u(t) = K_i \cdot \int e(t)dt$ có tác dụng triệt tiêu sai số tĩnh, tuy nhiên nếu K_i quá lớn có thể làm xấu đặc tính động học hoặc gây mất ổn định. Thành phần vi phân $u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$ giúp dự đoán xu hướng sai số, tăng tốc độ đáp ứng và giảm vọt lố, tuy nhiên nhạy với nhiễu tín hiệu đo.

Trong nghiên cứu này, tham số K_p , K_i , K_d được chỉnh định theo phương pháp thực nghiệm dựa trên quan sát đáp ứng mô phỏng. Đây là phương pháp phổ biến và thực tiễn khi mô hình toán học của đối tượng chưa được xác định chính xác hoàn toàn.

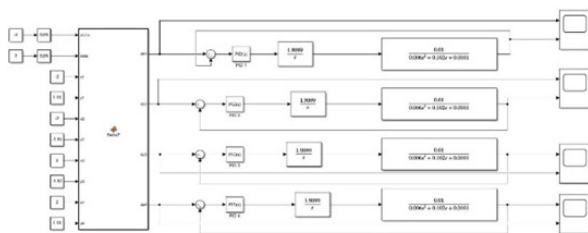
3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ ĐÁP ỨNG ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CHO HỆ THỐNG

Để chứng minh các cơ sở lý thuyết đã phân tích kể trên, tác giả đã xây dựng mô hình hệ thống và thiết kế điều khiển trên môi trường Simulink của Matlab.



3.1. Đáp ứng của bộ điều khiển PID

Khi khảo sát đáp ứng của bộ điều khiển PID, ta cần đặt các tham số đầu vào cho hệ thống, tác giả chọn ngẫu nhiên độ nghiêng của đài bắt bám mục tiêu là góc Roll (góc Alpha): -4 độ và góc Pitch (góc Beta): 3 độ. Trong trường hợp này, chân 4 đang là chân cao nhất, như vậy theo thuật toán đã xây dựng, chân 4 chỉ cần di chuyển đến khi chạm mặt đất và dừng lại để làm tham chiếu cho các chân còn lại.



Hình 5. Tham số đầu vào cho bộ điều khiển PID

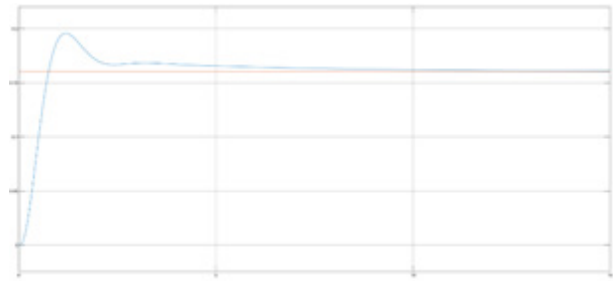
Kết quả đáp ứng của bộ điều khiển PID tại từng chân như sau:



Hình 6. Đáp ứng PID của chân kích số 1



Hình 7. Đáp ứng PID của chân kích số 2



Hình 8. Đáp ứng PID của chân kích số 3

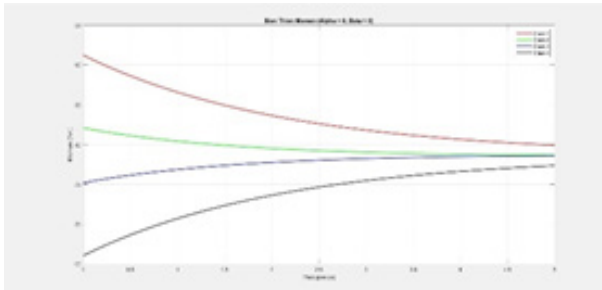
Đánh giá: Qua phương pháp dò tìm tham số bằng thực nghiệm, tác giả đưa ra được bộ tham số PID áp dụng cho các chân kích và thu được bộ điều khiển PID với độ vọt lố bảo đảm không ảnh hưởng đến độ chênh lệch hành trình giữa các chân kích dẫn đến mất thăng bằng đài bắt bám mục tiêu, thời gian xác lập đáp ứng đạt yêu cầu so với chỉ tiêu vận hành đề ra, sai lệch tĩnh về gần bằng 0 với thời gian xấp xỉ 10 giây cũng đạt yêu cầu so với chỉ tiêu vận hành.

3.2. Đáp ứng về momen của động cơ

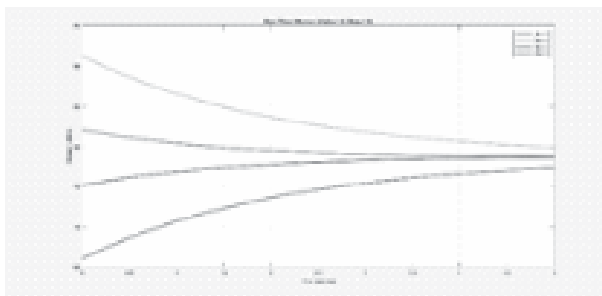
Tại phần khảo sát này, tác giả đặt bộ thông số đầu vào theo các thiết kế đã có của thiết bị bắt bám mục tiêu và các điều kiện giới hạn như sau:

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Khoảng cách 2 chân kích theo trục x	4	Mét
Khoảng cách 2 chân kích theo trục y	2.3	Mét
Bước ren trục vít	0.012	Mét
Hiệu suất trục vít	0.85	-
Góc nghiêng giới hạn của địa hình	± 5	Độ
Thời gian đưa đài bắt bám về vị trí thăng bằng	5	Giây

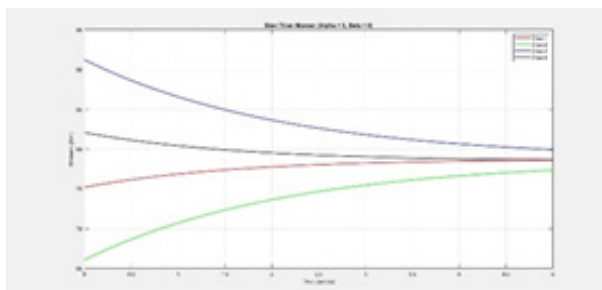
Khảo sát đáp ứng momen của các động cơ chân kích qua 4 trường hợp:



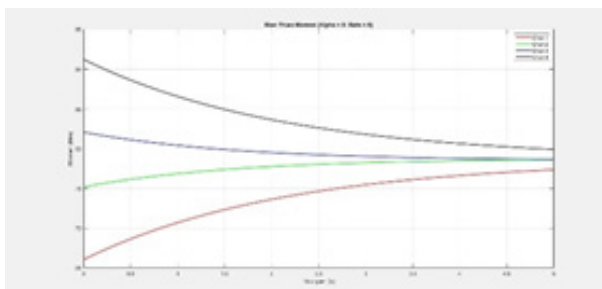
Hình 9. Trường hợp $\alpha > 0, \beta > 0$



Hình 10. Trường hợp $\alpha > 0, \beta < 0$



Hình 11. Trường hợp $\alpha < 0, \beta > 0$



Hình 12. Trường hợp $\alpha < 0, \beta < 0$

Đánh giá: Do trọng tâm của đài bắt bám

gần như rơi vào giao điểm của hai đường chéo nối tâm 4 chân kích theo hình chiếu bằng nên có thể nói vai trò của 4 chân kích là như nhau. Vì vậy, đồ thị đáp ứng momen qua các trường hợp góc nghiêng Roll và Pitch luân phiên thay đổi quanh giá trị 0 có hình dạng tương đối giống nhau. Nhận thấy khi đặt quy luật biến đổi của góc nghiêng Roll và Pitch theo hàm số e mũ, momen tại các đầu trục động cơ có xu hướng lớn ban đầu và giảm dần khi đến cuối giai đoạn thẳng bằng. Trên đây là trường hợp địa hình tương đối bằng phẳng, ngoài ra đối với trường hợp địa hình mấp mô nhiều, ta có thể đặt quy luật biến đổi của góc nghiêng Roll và Pitch theo dạng hình sin, hàm số ngẫu nhiên,... Khi đó, ta thu được biểu đồ đáp ứng momen có hình dạng khác. Từ biểu đồ momen trên, ta có thể thiết kế vòng điều khiển momen cho từng động cơ một cách chính xác.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp nghiên cứu và thiết kế hệ thống điều khiển cân bằng tự động cho thiết bị bắt bám mục tiêu đặt trên nền tảng di động. Mô hình động học và động lực học của hệ thống sàn xe sử dụng bốn chân chống đã được xây dựng, từ đó xác định được mối quan hệ giữa góc nghiêng của sàn và độ dịch chuyển của các cơ cấu chấp hành. Do hệ phương trình cân bằng lực và momen là hệ siêu tĩnh, phương pháp ma trận giả nghịch đảo Moore–Penrose đã được áp dụng để xác định phân bố lực tối ưu tại các chân chống. Thuật toán điều khiển PID kết hợp với cảm biến nghiêng IMU cho phép hệ thống tự động điều chỉnh vị trí các chân chống để đưa sàn xe về trạng thái cân bằng. Kết quả nghiên cứu tạo cơ sở cho việc phát triển mô hình mô phỏng và chế tạo hệ thống cân bằng thực tế trong các ứng dụng quân sự và các hệ thống đo lường chính xác trên nền tảng di động. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại vẫn còn một số hạn chế cần được

khắc phục trong các giai đoạn tiếp theo: (1) Các tham số PID hiện được chỉnh định bằng phương pháp thực nghiệm, chưa sử dụng phương pháp tối ưu hóa tự động; (2) Mô hình mô phỏng chưa tính đến ảnh hưởng của nhiễu động học khi xe đang di chuyển; (3) Chưa có kết quả thực nghiệm trên phần cứng thực tế. Hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm: chế tạo và thử nghiệm mô hình vật lý, áp dụng thuật toán tối ưu hóa tham số PID tự động (như giải thuật di truyền hoặc PSO), mở rộng mô hình cho trường hợp xe đang di chuyển, và tích hợp bộ lọc Kalman để nâng cao độ chính xác đọc tín hiệu từ cảm biến IMU.❖

Ngày nhận bài: **24/4/2026**

Ngày phản biện: **02/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Jianjun Wang, Jingyi Zhao, Wei Cai, Wenlei Li, Xing Jia, Peng Wei (2021), “*Leveling Control of Vehicle Load-Bearing Platform Based on Multisensor Fusion*”. Journal of Sensors. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8895459>
- [2]. GANG Xianyue, CHAI Shan (2013), “*Optimal Load Balancing Leveling Method for Multi-leg Flexible Platforms*”. Chinese Journal of Mechanical Engineering. DOI: 10.3901/CJME.2013.05.900
- [3]. Pablo González de Santos, Elena Garcia, Joaquin Estremera (2006), “*Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-Legged Robots*”. <https://doi.org/10.1007/1-84628-307-8>
- [4]. Roy Featherstone (1987), “*Robot Dynamics Algorithms*”. The Springer International Series in Engineering and Computer Science.
- [5]. Maziar Ahmad Sharbafi, André Seyfarth (2017), “*Bioinspired Legged Locomotion*”. DOI: 10.1016/C2014-0-04899-X
- [6]. Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Phùng Quang (2008), “*Điều khiển tự động truyền động điện*”.
- [7]. Nguyễn Doãn Phước (2009), “*Cơ sở điều khiển tự động*”.