

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO ROBOT 4 DOF KẸ CHỈ SƠN ĐƯỜNG BỘ ỨNG DỤNG THỊ GIÁC MÁY TÍNH

STUDYING AND MANUFACTURING OF A 4-DOF ROAD MARKING ROBOT UTILIZING COMPUTER VISION

SVTH: **Đỗ Trọng Vinh, Đinh Phú Giang, Ngô Đạt Huy**

Lớp 20THDCLC1, Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa _Đại học Đà Nẵng; Email: 105200396@sv1.dut.udn.vn

105200364@sv1.dut.udn.vn 105200297@sv1.dut.udn.vn

GVHD: **Nguyễn Hoàng Mai**

Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa _Đại học Đà Nẵng; Email: nghmaidu@gmail.com

Tóm tắt - Hệ thống giao thông ngày càng hoàn thiện, kéo theo nhu cầu nâng cao thẩm mỹ và hiệu quả của quá trình kẻ sơn đường. Đề tài này đề xuất một giải pháp khoa học giúp tự động hóa quá trình kẻ sơn, thay thế phương pháp thủ công dưới thời tiết khắc nghiệt, đảm bảo độ chính xác và thẩm mỹ cao hơn. Thiết bị kẻ sơn di chuyển theo hệ trục cố định, dựa trên đường dây kim loại giảng sẵn. Tuy nhiên, do mặt đường gồ ghề và có nhiều vụn đá, cảm biến kim loại gặp khó khăn trong việc nhận tín hiệu. Để khắc phục, công nghệ xử lý ảnh được tích hợp giúp nhận diện, phân tích hình ảnh và điều chỉnh hướng di chuyển của robot. Dù robot được điều khiển tối ưu, dao động nhỏ khi di chuyển vẫn ảnh hưởng đến độ chính xác của vạch sơn. Do đó, một cánh tay robot 2 bậc tự do tích hợp súng phun sơn giúp triệt tiêu sai lệch, đảm bảo vạch sơn đạt tiêu chuẩn và tính thẩm mỹ cao nhất.

Từ khóa - Robot kẻ chỉ sơn đường, công nghệ xử lý ảnh, cánh tay robot, đường dây kim loại, dao động.

Abstract - With significant investments being made in the industrial application of science and technology, the road traffic system is currently being improved on a regular basis. Making roads aesthetically pleasing and functionally functional is one of the issues that need to be addressed. By using scientific and technical solutions, manual methods can be made more aesthetically pleasing and convenient, especially in hot weather. We decided to use a prearranged metal line to guide the robot in order to help the painting equipment work automatically on a fixed axis system. On the other hand, using metal sensors for control will have a lot of challenges in receiving signals due to the irregular road surface and numerous small rock chips. In order to determine the robot's direction and deflection angle, we employ computer vision technology to identify and analyze images. Even with the best possible control, a small fluctuation in the robot's navigation cannot be avoided, and this is especially true when spraying paint. In order to produce standard road markings that are also the most aesthetically pleasing, we employ a robot arm with two degrees of freedom. The paint spray gun is placed on top of the arm to eliminate any tiny deviations that may occur during the robot's navigation process.

Key words - Road line painting robots; computer vision technology; robot arm; metal line; fluctuation.

1. Đặt vấn đề

Robot tự hành ngày càng quan trọng trong sản xuất, xây dựng và giao thông, giúp tăng hiệu suất và giảm sức lao động. Trong kẻ vạch đường, robot có thể thay thế phương pháp thủ công, đảm bảo an toàn và độ chính xác cao nhờ hệ thống điều khiển tiên tiến.

Nghiên cứu này phát triển hệ thống điều khiển robot kẻ vạch đường, tích hợp vi điều khiển, xử lý ảnh, điều khiển PID và cánh tay robot. Thuật toán xử lý ảnh giúp xác định vị trí, góc lệch so với dây kim loại, từ đó điều chỉnh hướng đi. Dù được kiểm soát tốt, robot vẫn có dao động nhỏ khi di chuyển, ảnh hưởng đến độ đều vạch sơn. Để khắc phục, cánh tay robot 2 bậc tự do với súng phun sơn giúp triệt tiêu sai lệch, đảm bảo vạch sơn chính xác.

Ngoài ra, robot có thể tận dụng năng lượng mặt trời để kéo dài hoạt động. Ứng dụng công nghệ điều khiển tiên tiến giúp nâng cao chất lượng kẻ vạch và mở rộng tiềm năng tự động hóa trong giao thông.

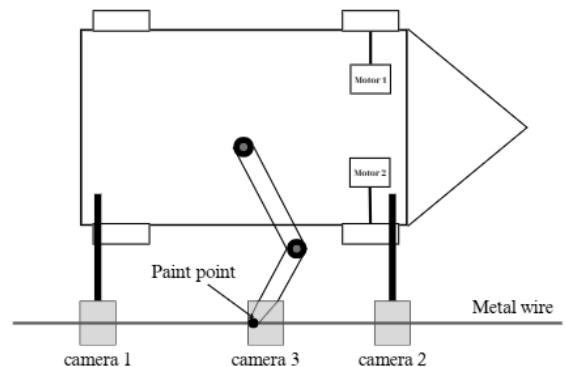
2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Cơ chế hoạt động của Robot

2.1.1. Nguyên lý hoạt động

Robot kẻ vạch đường bộ dựa trên việc sử dụng hai động cơ được gắn vào hai bánh trước để điều chỉnh tốc độ và hướng di chuyển. Hai bánh sau được thiết kế tự do, không gắn động cơ, nhằm giúp robot có sự linh hoạt trong việc thay đổi hướng đi mà vẫn đảm bảo ổn định trong quá

trình di chuyển.



Hình 1: Mô tả thuật toán của robot

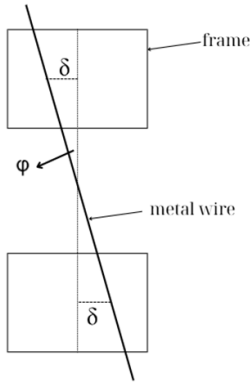
Để robot di chuyển chính xác theo đường dây kim loại, hệ thống sử dụng hai camera (camera 1 và camera 2) để quan sát và nhận diện đường đi. Dữ liệu hình ảnh thu thập được sẽ được xử lý nhằm xác định vị trí và hướng di chuyển của robot so với đường dây. Thông qua các thuật toán xử lý ảnh, robot tính toán khoảng cách và góc lệch so với đường dây, sau đó điều chỉnh động cơ để đảm bảo chuyển động ổn định và bám sát quỹ đạo. Trong quá trình di chuyển, robot thực hiện kẻ sơn theo đúng đường dây kim loại, đảm bảo độ chính xác cao trong việc kẻ vạch đường.

2.1.2. Hệ thống điều khiển

δ: Khoảng cách giữa trung điểm đoạn dây kim loại và trục dọc của khung hình camera.

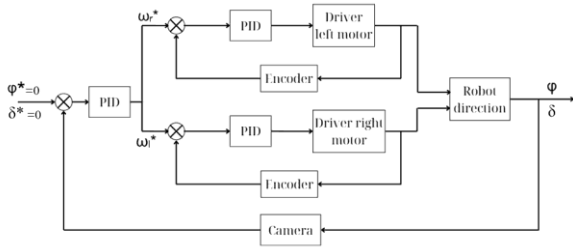
φ: Góc lệch của đường dây kim loại so với trục dọc

khung hình camera.



Hình 2

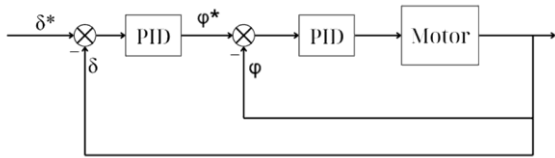
Ta đưa ra sơ đồ khối hệ thống



Hình 3: Sơ đồ khối hệ thống

Đầu vào: δ, ϕ

Từ đó ta thiết kế sơ đồ khối hệ thống điều khiển hướng đi của robot



Hình 4: Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển hướng đi của robot

Mặc dù hệ thống điều khiển đã được tối ưu, robot vẫn có thể gặp sai lệch nhỏ khi bám theo đường dây kim loại, ảnh hưởng đến chất lượng vạch sơn – điều này không thể chấp nhận trong các công việc đòi hỏi độ chính xác cao. Để khắc phục, hệ thống được tích hợp thêm một cánh tay robot 2 bậc tự do, có gắn camera 3 và cơ chế kẻ sơn.

Camera 3 sẽ tiếp tục xử lý hình ảnh để xác định chính xác vị trí đường dây, sau đó gửi tín hiệu điều khiển đến cánh tay robot. Nhờ đó, đầu kẻ sơn luôn bám sát và điều chỉnh theo đúng hướng của đường dây kim loại, giúp giảm sai lệch do chuyển động của robot. Sự kết hợp này đảm bảo đường vạch sơn được kẻ chính xác, đồng đều, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật khắt khe trong thi công đường bộ.

Từ những mô tả về quy trình điều khiển của robot ra tóm lại những nội dung chính như sau:

- Ứng dụng công nghệ xử lý ảnh để xác định khoảng cách và góc lệch của robot so với đường dây kim loại, từ đó đưa ra các điều chỉnh hướng đi phù hợp.
- Mô hình hóa động cơ điện một chiều để đưa ra hàm truyền đạt của hệ thống nhằm tìm ra được các thông số của bộ điều khiển PID và đánh giá chất lượng điều khiển.
- Thực hiện điều khiển cánh tay robot 2 bậc tự do.

2.2. Mô hình toán học của hệ thống

Mô hình toán học của động cơ:

Phương trình điện áp phản ứng:

$$V_a(t) = e_a(t) + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (1)$$

Biến đổi Laplace:

$$V_a(s) = E_a(s) + R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) \quad (2)$$

$$\text{Nên: } I_a(s) = \frac{V_a(s) - E_a(s)}{L_a(s) + R_a} \quad (3)$$

Lực điện động của động cơ:

$$e_a(t) = K_e \phi \omega(t) \quad (4)$$

Biến đổi Laplace:

$$E_a(s) = K_e \phi \omega(s) \quad (5)$$

Phương trình mô-men xoắn điện từ:

$$M_e(t) = K_M \phi i_a(t) \quad (6)$$

Biến đổi Laplace:

$$M_e(s) = K_M \phi I_a(s) \quad (7)$$

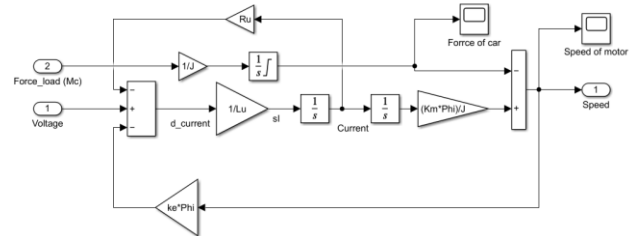
Phương trình đặc tính cơ:

$$M_e(t) - M_c(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (8)$$

Biến đổi Laplace:

$$M_e(s) - M_c(s) = J s \omega(s) \quad (9)$$

$$\text{Nên: } \omega(s) = \frac{K_M \phi I_a}{J} - \frac{1}{J} F(s) \quad (10)$$

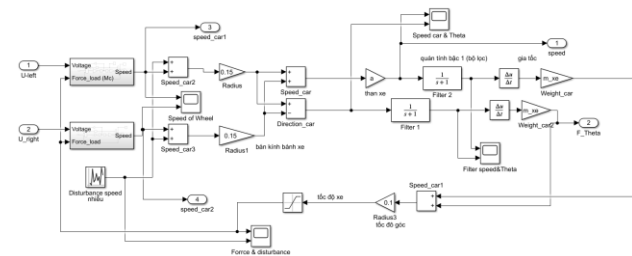


Hình 5: Sơ đồ khối mô hình hóa động cơ một chiều

Lực tải tác động lên hệ thống:

$$M_c = F(s) = m_{xe} \cdot a \quad (11)$$

Với M_c gồm $F_{cản}$, $F_{nhiều}$, M_{quay}



Hình 6: Mô hình tính M_c , tốc độ xe, M_{quay}

Hàm truyền hệ hở của động cơ:

$$G(s) = \frac{w(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(sJ)(sL_a + R_a) + K_m K_e} \quad (12)$$

Dựa vào datasheet của động cơ MY1016Z2-250W:

$P_{dm} = 250W$

$U_{dm} = 24V$

$\omega_{dm} = 3000 \text{ RPM (no gearbox yet)}$

After passing through the gearbox: $\omega_{1dm} = 300 \text{ RPM}$

$I_{dm} = 13,4 \text{ A with no load}$

$$R_a = 0.7 (\Omega)$$

$$L_a = 0.00047 (H)$$

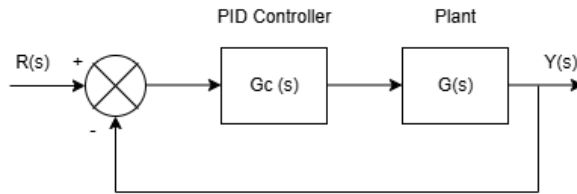
$$K_m = \frac{T}{I} = \frac{P/\omega'}{I} = \frac{P/\frac{\omega \cdot 2\pi}{60}}{I} = 0.06 \text{ Nm/A} \quad (13)$$

$$K_e = \frac{V}{\omega'} = \frac{V}{\frac{\omega \cdot 2\pi}{60}} = 0.08 \text{ Vs/rad} \quad (14)$$

$$J = 0.00015 \text{ Kg.m}^2$$

$$\text{Ta có: } G(s) = \frac{0.06}{7.05 \cdot 10^{-7} s^2 + 1.05 \cdot 10^{-4} s + 4.87 \cdot 10^{-3}} \quad (15)$$

Bộ điều khiển PID được thiết kế bằng phương pháp điều chỉnh Zeigler-Nichols:



Hình 3:7: Sơ đồ khối vòng kín

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s\right)$$

Chạy mô phỏng MATLAB với đầu vào dưới dạng hàm bước đơn vị. Sử dụng phương pháp tham chiếu hai điểm:

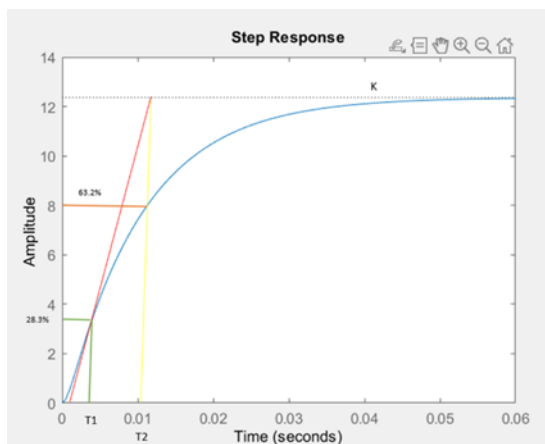
Tại hai điểm cụ thể trên phản hồi bước:

t1: Thời gian tương ứng với 28.3% thay đổi đầu ra (Δy).

t2: Thời gian tương ứng với 63.2% thay đổi đầu ra (Δy).

$$\text{Thời gian trễ: } L = 1.5 \left(t_1 - \frac{t_2}{3}\right) = t_2 - T$$

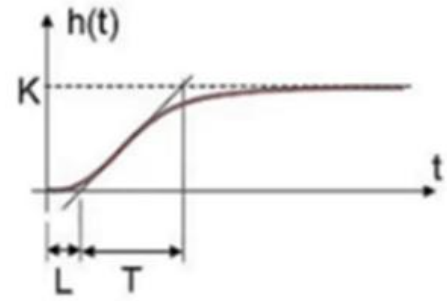
$$\text{Hằng số thời gian: } T = 1.5(t_2 - t_1)$$



Từ biểu đồ, giá trị cuối cùng của phản hồi:

$$y_{\infty} = K = 12.7$$

$$\text{vậy: } T = 0.009, L = 0.001$$

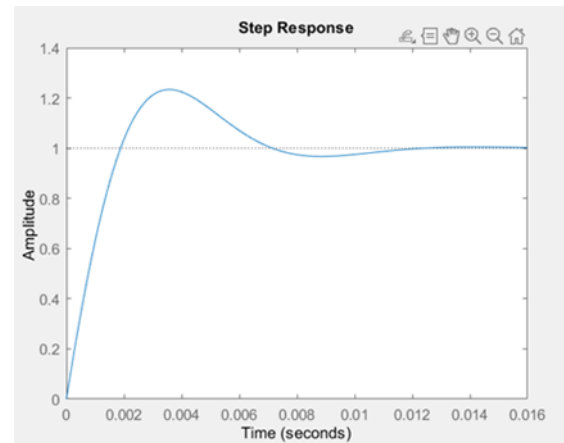


	K_p	K_i	K_d
P	T/L	0	0
PI	$0.9 T/L$	$0.3/L$	0
PID	$1.2 T/L$	$0.5/L$	$0.5L$

Thông số bộ điều khiển PID:

$$K_p = 10.8, K_i = 500, K_d = 0.0005$$

$$G_c(s) = 10.8 + \frac{500}{s} + 0.0005s$$



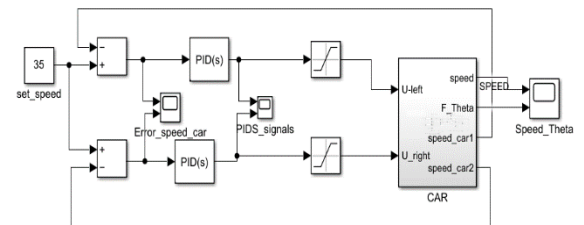
Hình 8: Đáp ứng từng bước của hệ thống với điều khiển vòng kín

Hệ thống có phản hồi, giúp điều chỉnh lỗi và cung cấp phản hồi đầu ra nhanh hơn.

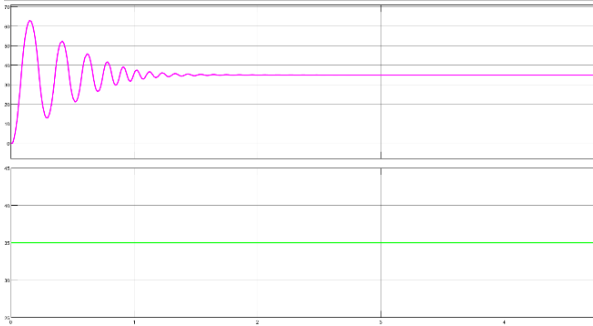
Đường cong phản hồi thể hiện quá độ và dao động nhẹ trước khi ổn định.

Thời gian xác lập nhanh hơn so với hệ thống hở vòng

Còn dao động nhỏ xung quanh giá trị mong muốn.

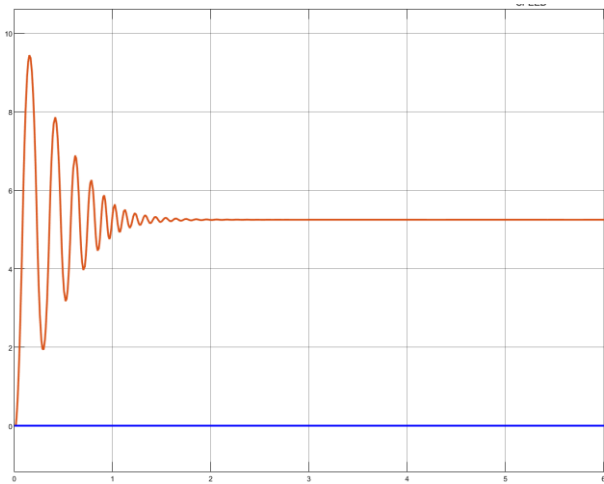


Hình 9: Mô phỏng MATLAB cho động cơ



Tốc độ thực của động cơ có thời gian xác lập khoảng 2 giây để ổn định về giá trị mong muốn là 35. Sau thời gian này, tốc độ bám sát tốt giá trị đặt với sai số gần như bằng không. Tuy nhiên, hệ thống có độ lớn lớn, đạt giá trị cực đại khoảng 70. Trong giai đoạn quá độ, hệ thống dao động mạnh nhưng tắt dần sau khoảng 2 giây trước khi ổn định hoàn toàn. Nhìn chung, hệ thống đảm bảo bám sát giá trị mong muốn sau quá trình quá độ.

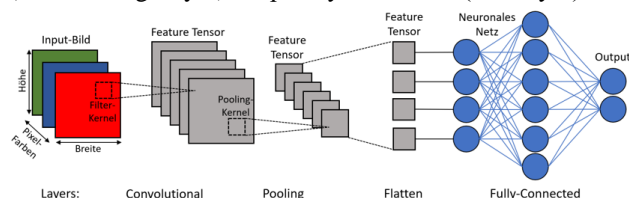
$$speed_{xe} = R_{bánh} \cdot \omega = 0.15 \times 35 = 5.25 \text{ (rad/s)}$$



Tốc độ thực của động cơ có thời gian xác lập khoảng 2 giây để đạt giá trị mong muốn là 5 rad/s. Hệ thống có độ lớn lớn, với giá trị cực đại đạt khoảng 10 rad/s. Trong giai đoạn quá độ, tốc độ dao động mạnh với biên độ giảm dần và ổn định hoàn toàn sau khoảng 2 giây. Sau khi ổn định, tốc độ bám sát giá trị mong muốn với sai số gần như bằng không. Đường màu xanh biểu diễn mô-men quay giữ giá trị không đổi theo thời gian, điều này cho thấy mô-men tác động đến hệ thống không thay đổi và không bị ảnh hưởng bởi dao động của tốc độ động cơ. Nhìn chung, hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu bám giá trị mong muốn nhưng có độ quá điều chỉnh cao

2.3. CNN nhận diện đường dây kim loại

CNN là một loại mạng nơ-ron nhân tạo được thiết kế để xử lý dữ liệu hình ảnh, hoạt động thông qua các lớp tích chập (Convolutional layers) và lớp pooling nhằm trích xuất đặc trưng hiệu quả. CNN có ba thành phần chính: lớp tích chập (Convolution Layer), Lớp pooling (MaxPooling Layer), Lớp fully connected (FC Layer).



Hình 10: công nghệ CNN

Sử dụng bài toán phân đoạn ảnh (Segmentation): trong đó mỗi pixel trong ảnh đầu vào được phân loại là thuộc về dây kim loại hoặc không. Mô hình sử dụng hàm kích hoạt sigmoid để xác định xác suất từng pixel thuộc vào dây kim loại.

2.3.1. Dữ liệu và tiền xử lý

- Tập dữ liệu: tập mẫu ảnh mặt đường có dây kim loại và tập ảnh mask tương ứng.
- Tiền xử lý:
 - + Chuyển đổi ảnh sang dạng RGB, chuẩn hóa về kích thước 128x128 pixels.
 - + Chuẩn hóa giá trị pixel về khoảng [0,1].
 - + Tách dữ liệu thành tập huấn luyện (80%) và tập kiểm tra (20%).

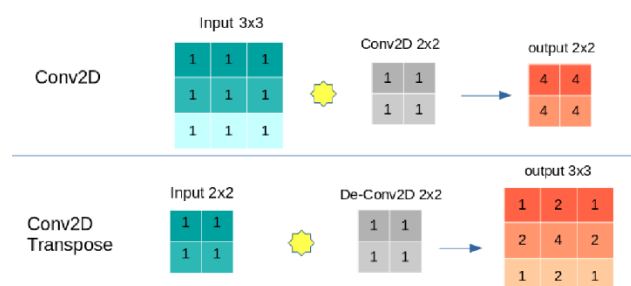
2.3.2. Kiến trúc mô hình CNN

- Bộ mã hóa (Encoder - Downsampling): Phân bộ mã hóa của mô hình CNN có nhiệm vụ trích xuất đặc trưng từ ảnh đầu vào thông qua các lớp tích chập và giảm kích thước dần bằng các lớp MaxPooling. Cấu trúc gồm 3 khối chính:
 - + Một lớp tích chập (Conv2D) với số kênh tăng dần: 8 → 16 → 32.
 - + Hàm kích hoạt ReLU giúp mô hình học được các đặc trưng phi tuyến.
 - + Lớp MaxPooling2D với kernel (2x2) để giảm kích thước ảnh còn một nửa.
 - + Sau khối cuối cùng, có thêm lớp Dropout (0.15) để giảm overfitting.

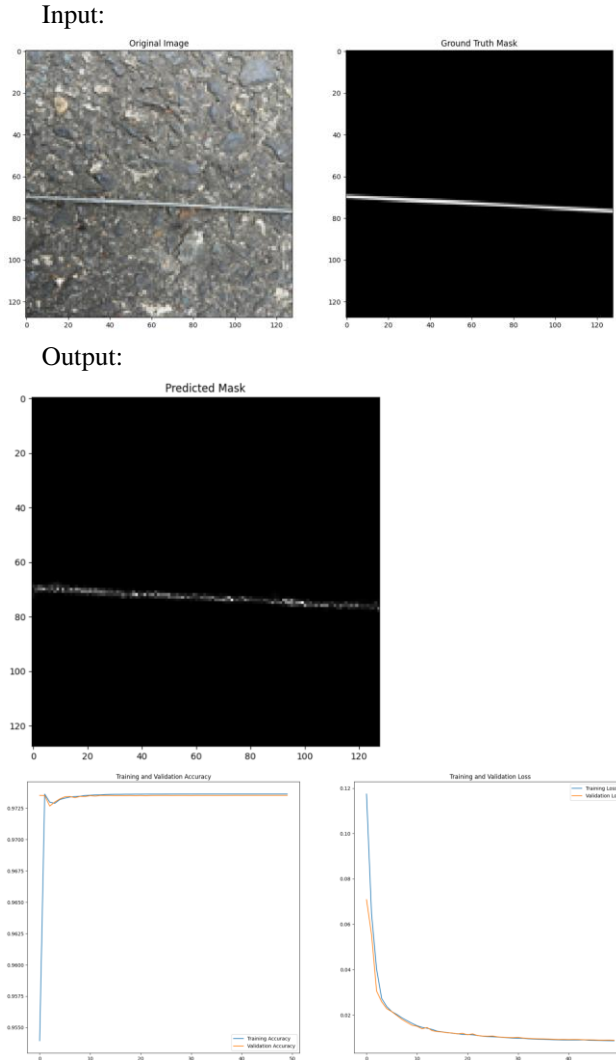
Các lớp này giúp mô hình tập trung vào các đặc trưng quan trọng của dây kim loại, đồng thời giảm kích thước ảnh để tối ưu tính toán.

- Bộ giải mã: Sau khi trích xuất đặc trưng, bộ giải mã khôi phục kích thước ảnh về lại 128x128 pixels bằng cách sử dụng Conv2DTranspose (chuyển tích chập). Cấu trúc gồm 3 khối chính:
 - + Một lớp chuyển tích chập (Conv2DTranspose) với số kênh giảm dần: 32 → 16 → 8.
 - + Hàm kích hoạt ReLU để đảm bảo tính phi tuyến trong việc tái tạo ảnh.
 - + Mỗi bước Upsampling làm tăng gấp đôi kích thước ảnh.
 - + Cuối cùng, lớp đầu ra có: Lớp tích chập (Conv2D) với kernel (1x1) và hàm kích hoạt sigmoid, giúp mô hình phân loại từng pixel với giá trị từ 0 đến 1.

Phần này giúp tái tạo lại hình dạng của dây kim loại, từ đó tạo ra mặt nạ phân đoạn chính xác.



2.3.3. Kết quả:



Hình 11: đồ thị độ chính xác tập huấn luyện so với tập kiểm tra

Nhìn vào đồ thị ta có thể thấy độ chính xác trên tập huấn luyện và tập kiểm tra gần như trùng nhau, với accuracy: 0.9733 - loss: 0.0127, điều này cho thấy mô hình hội tụ tốt, không có dấu hiệu về vấn đề underfitting hoặc overfitting.

2.4. Cánh tay robot

Cánh tay robot 2 bậc tự do (2-DOF) là hệ thống robot hoạt động trong không gian 2D, ứng dụng trong gấp-thả, hàn, hoặc các nhiệm vụ yêu cầu độ chính xác cao.

2.4.1. Phương trình động học thuận

Thông số động học

Cánh tay gồm hai khâu với tham số Denavit-Hartenberg (DH):

Frame No.	a_i	α_i	d_i	q_i
1	L1	0	0	q_1
2	L2	0	0	q_2

Trong đó:

- L1 và L2 là độ dài của khâu 1 và khâu 2.
- q_1 và q_2 là góc khớp quay của khâu 1 và khâu 2, điều khiển hướng và vị trí của chấp hành cuối.

Ma trận biến đổi thuận nhất

Từ gốc đến khớp 1:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & L_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & L_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ khớp 1 đến khớp 2:

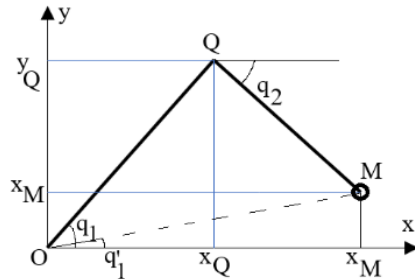
$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & L_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận tổng hợp: ${}^0T_2 = {}^0T_1 {}^1T_2$

Dựa trên 0T_2 ta có vị trí đầu cuối của robot:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \\ L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

2.4.2. Phương trình động học nghịch



Dựa theo hình $l_1 = OQ$, $l_2 = QM$, với qui ước $q_1 = q_1'' + q_1'$, khi biết trước tọa độ x_M, y_M , ta sẽ có:

$$q_1' = \arctan\left(\frac{y_M}{x_M}\right); q_1'' = \arccos\left(\frac{x_M^2 + y_M^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x_M^2 + y_M^2}}\right).$$

Từ đó ta suy ra tọa độ của điểm Q sẽ là:

$$x_Q = l_1 \cos q_1; y_Q = l_1 \sin q_1$$

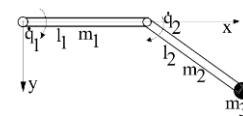
Và góc q_2 :

$$q_2 = \arctan\left(\frac{y_Q - y_M}{x_Q - x_M}\right)$$

Như vậy khi xác định được phương trình của quỹ đạo đặt M, ta sẽ hoàn toàn xác định được các góc điều khiển các khớp robot tương ứng.

2.4.3. Phương trình động lực học Lagrange

Phần thân robot là cánh tay máy 2 bậc tự do quay trong mặt phẳng nằm ngang. Do đó, ta xây dựng phương trình động lực của cơ hệ với chiều dài các link là l_1 và l_2 cùng khối lượng m_1 và m_2 tương ứng, với giả thiết là khối lượng phân bố đều trên dọc thanh, như sau:



Bởi vì hai link chuyển động quay trên mặt phẳng ngang nên thế năng bị bỏ qua, như vậy hàm Lagrange còn lại động năng, được xác định theo:

$$K_1 = \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 = \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{q}_1^2$$

Đối với thanh 2 thì phức tạp hơn, gồm có 3 thành phần

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos q_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos q_2 \\ y_2 = l_1 \sin q_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin q_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_2 = -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2} l_2 \dot{q}_2 \sin q_2 \\ \dot{y}_2 = l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + \frac{1}{2} l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 \\ \dot{y}_3 = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_3 = -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - l_2 \dot{q}_2 \sin q_2 \\ \dot{y}_3 = l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 \end{cases}$$

$$K2 = m_2 l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{7}{24} m_2 l_2^2 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 - q_2) + m_3 l_1^2 \dot{q}_1^2 + m_3 l_2^2 \dot{q}_2^2 + m_3 l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 - q_2) + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos q_2 \dot{q}_1^2 + m_3 l_1 l_2 \cos q_2 \dot{q}_1^2$$

$$\text{Phương trình lagrange: } L = K_1 + K_2 = m_2 l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{7}{24} m_2 l_2^2 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 - q_2) + m_3 l_1^2 \dot{q}_1^2 + m_3 l_2^2 \dot{q}_2^2 + m_3 l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 - q_2) + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos q_2 \dot{q}_1^2 + m_3 l_1 l_2 \cos q_2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{q}_1^2$$

Từ đó, ta có động lực trên hai khớp robot sẽ là:

$$F1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \left(\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + 2 m_2 l_1^2 + 2 m_3 l_1^2 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos q_2 + 2 m_3 l_1 l_2 \cos q_2 \right) \ddot{q}_1 + \left(\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(q_1 - q_2) + m_3 l_1 l_2 \cos(q_1 - q_2) \right) \ddot{q}_2 - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{q}_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \sin(q_1 - q_2) - m_3 l_1 l_2 \dot{q}_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \sin(q_1 - q_2) - m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin q_2 - 2 m_3 l_1 l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin q_2 + l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \sin(q_1 - q_2) \left[m_3 + \frac{1}{2} m_2 \right]$$

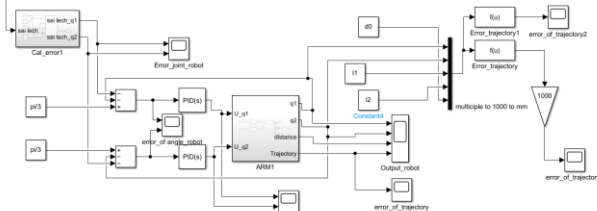
$$F2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \left(\frac{1}{2} m_2 l_1 \cos(q_1 - q_2) + m_3 l_1 l_2 \cos(q_1 - q_2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\frac{7}{12} m_2 l_2^2 + 2 m_3 l_2^2 \right) \ddot{q}_2 - \frac{1}{2} m_2 l_1 \dot{q}_1 l_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \sin(q_1 - q_2) - m_3 l_1 \dot{q}_1 l_2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \sin(q_1 - q_2) - \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) l_1 \dot{q}_1 l_2 \dot{q}_2 \sin(q_1 - q_2) + \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) l_1 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2$$

Ta có thể viết lại các phương trình động lực theo dạng như sau

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{M}_r(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}_r(\mathbf{q})$$

2.4.1. Thiết kế bộ điều khiển

a) Sử dụng các bộ điều khiển PID chỉnh định theo phương pháp dò thực nghiệm.



Yêu cầu sai lệch đầu ra không đạt khi yêu cầu sai lệch dưới $\pm 5\text{mm}$ (đến 45mm).

b) Thiết kế bộ điều khiển SMAC

Bộ điều khiển SMAC thường được sử dụng trong các hệ thống yêu cầu độ chính xác cao, điều khiển vị trí, lực và vận tốc mượt mà

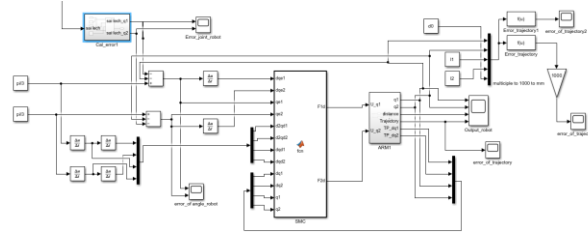
Sử dụng phương trình:

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{M}_r(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}_r(\mathbf{q}) + \mathbf{D}(t)$$

Với $\mathbf{D}(t)$ là nhiễu do xe gây ra cho tay máy.

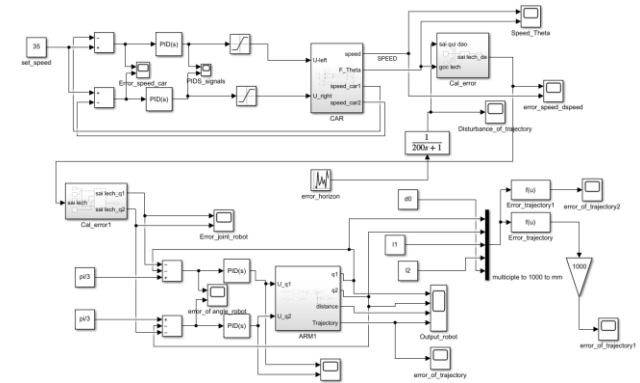
Gọi \mathbf{q}_{cs} là vector lượng đặt đầu vào của xe, $\mathbf{q}_{ce} = \mathbf{q}_{cs} - \mathbf{q}_c$ là vector sai lệch thì ta sẽ có:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_c &= \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)(\ddot{\mathbf{q}}_{cs} - \ddot{\mathbf{q}}_{ce}) + \mathbf{N}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)(\dot{\mathbf{q}}_{cs} - \dot{\mathbf{q}}_{ce}) = \\ &= \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)\ddot{\mathbf{q}}_{cs} + \mathbf{N}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)\dot{\mathbf{q}}_{cs} - \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)\ddot{\mathbf{q}}_{ce} - \mathbf{N}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)\dot{\mathbf{q}}_{ce} = \\ &= \mathbf{Q}_{cs} - \mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)\ddot{\mathbf{q}}_{ce} - \mathbf{N}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)\dot{\mathbf{q}}_{ce} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{ce} &= \mathbf{M}_c^{-1}(\mathbf{q}_c)[\mathbf{Q}_{cs} - \mathbf{F}_c - \mathbf{N}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)\dot{\mathbf{q}}_{ce}] \end{aligned}$$



3. Bàn luận

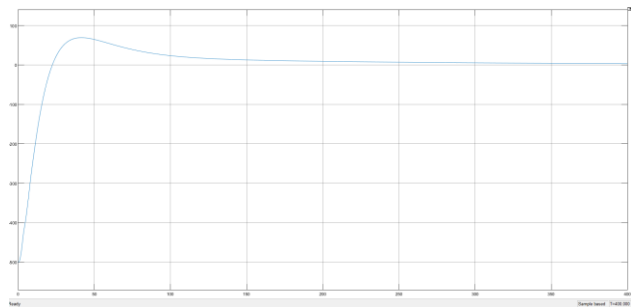
3.1. Mô hình động lực học sử dụng bộ điều khiển PID cho cánh tay robo



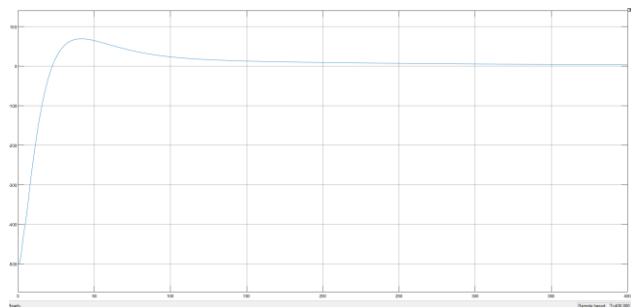
Hình 12: Sơ đồ khối hệ thống sử dụng PID

Kết quả:

- Khi không có nhiễu:



- Khi có nhiễu:



Nhận xét:

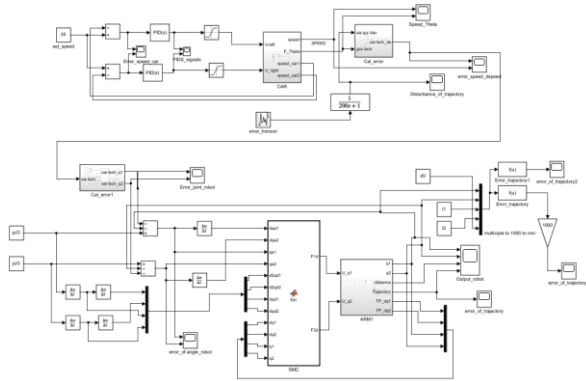
Sử dụng các bộ điều khiển PID chỉnh định theo phương pháp dò thực nghiệm và đưa vào mô phỏng, ta được kết quả sai lệch đầu ra như hình :

- Kết quả mô phỏng cho thấy sai lệch đầu ra khi có nhiễu không đạt khi yêu cầu sai lệch dưới $\pm 5\text{mm}$ (đến

>10mm).

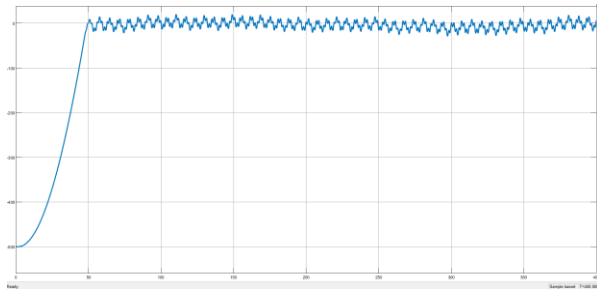
- Tuy nhiên khi không có nhiễu thì PID hoạt động lại đạt yêu cầu sai lệch

3.2. Mô hình động lực học sử dụng bộ điều khiển SMC cho cánh tay robot



Hình 13: Sơ đồ khối hệ thống sử dụng SMC

Kết quả:



Nhận xét: khi sử dụng bộ điều khiển trượt SMC ta thấy hệ thống tuy vẫn chưa đáp ứng được yêu cầu về sai lệch, hệ thống vẫn chưa ổn định nhưng thời gian đáp ứng đã được rút ngắn rất nhiều so với bộ điều khiển PID.

4. Kết luận

Hệ thống robot kẻ vạch đường vẫn đang trong giai đoạn thử nghiệm, bước đầu cho thấy tiềm năng ứng dụng công nghệ xử lý ảnh trong điều khiển chuyển động và kẻ vạch chính xác.

Robot sử dụng hai camera để xác định khoảng cách và góc lệch so với đường dây kim loại, từ đó điều chỉnh hướng đi. Dù hệ thống vẫn gặp một số vấn đề như nhiễu trong xử lý ảnh và thuật toán chưa tối ưu, kết quả thử nghiệm cho thấy hướng đi đúng đắn để tiếp tục cải thiện.

Mô hình động cơ điện một chiều và bộ điều khiển PID giúp robot di chuyển ổn định theo đường dây. Tuy nhiên, để áp dụng thực tế, cần tinh chỉnh thêm các thông số PID cho phù hợp với môi trường hoạt động.

Cánh tay robot 2 bậc tự do (2-DOF) hỗ trợ điều chỉnh vị trí kẻ vạch chính xác hơn. Mô phỏng MATLAB Simulink cho thấy cánh tay có thể vẽ đúng quỹ đạo nhờ điều khiển PID, nhưng khi vận hành thực tế, cần đánh giá thêm các yếu tố như rung lắc hay bề mặt không bằng phẳng.

Dù mới chỉ ở giai đoạn thử nghiệm, kết quả đạt được cho thấy tiềm năng phát triển hệ thống. Trong tương lai, việc tối ưu thuật toán xử lý ảnh và hệ thống điều khiển sẽ giúp nâng cao độ chính xác, mở ra nhiều ứng dụng khác như kẻ vạch trong bãi đỗ xe, công trình công nghiệp hay robot tự hành.

Tài liệu tham khảo

- [1] Nguyễn Phùng Quang, Andreas Dittrich, Truyền động điện thông minh, NXB Khoa học và kỹ thuật 2002 NED-Mohan, Electric drives- An integrative approach, MNPERE,2003.
- [2] Introduction to Robotics - 3rd edition - John J Craig.