

ISSA-PID Optimization Algorithm Design for Mobile Robot Differential Motion Control

Thi-Minh-Tam Le¹, Thanh-Hai Pham¹, Duc-Hung Pham¹, Viet-Ngu Nguyen¹, Ngoc-Thang Pham^{1*}
Hung Yen University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: phamngocthangutehy@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: 10/09/2025
Revised: 22/12/2025
Accepted: 15/01/2026
Published: 28/02/2026

KEYWORDS

Mobile robot;
Trajectory tracking;
PID control;
Improved Sparrow Search
Algorithm (ISSA);
Intelligent optimization.

ABSTRACT

In recent years, trajectory tracking for differential-drive mobile robots has been widely studied due to the growing demand for applications in logistics, autonomous transportation, and surveillance. Consequently, improving tracking accuracy and ensuring stable operation under disturbances and uncertainties have become important directions for autonomous navigation systems. To address this problem, various control methods have been applied, among which the PID controller remains popular thanks to its simple structure and ease of implementation. However, conventional control schemes often depend heavily on manual parameter tuning and are sensitive to disturbances and model uncertainties; moreover, their performance may deteriorate in the presence of actuator saturation and wheel slip, leading to oscillations and the integral windup phenomenon. Based on these considerations, this paper proposes a control strategy that combines an improved PID controller with an Improved Sparrow Search Algorithm (ISSA) to optimize the PID parameters K_p, K_i, K_d for trajectory tracking. The effectiveness of the proposed method is validated through simulations on a figure-eight trajectory and evaluated using metrics such as RMSE, maximum tracking error, oscillation level, and control effort. The results demonstrate that the proposed PID-ISSA approach improves both tracking accuracy and stability compared with basic PID configurations.

Thiết kế thuật toán tối ưu ISSA-PID điều khiển chuyển động vi sai Robot Mobile

Lê Thị Minh Tâm¹, Phạm Thanh Hải¹, Phạm Đức Hùng¹, Nguyễn Việt Ngự¹, Phạm Ngọc Thắng^{1*}
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: phamngocthangutehy@gmail.com

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 10/09/2025
Ngày hoàn thiện: 22/12/2025
Ngày chấp nhận đăng: 15/01/2026
Ngày đăng: 28/02/2026

TỪ KHÓA

Rô-bốt di động;
Bám quỹ đạo;
Điều khiển PID;
Thuật toán tìm kiếm chim sẻ
cải tiến (ISSA);
Thuật toán tối ưu thông minh.

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, bài toán bám quỹ đạo cho robot di động dẫn động vi sai được nghiên cứu rộng rãi nhờ nhu cầu ứng dụng ngày càng tăng trong logistics, vận chuyển tự động và giám sát. Việc nâng cao độ chính xác bám và tính ổn định khi hoạt động trong điều kiện nhiễu và bất định vì thế trở thành một hướng tiếp cận quan trọng trong các hệ thống điều hướng tự hành. Để giải quyết bài toán này, nhiều phương pháp điều khiển đã được áp dụng, trong đó bộ điều khiển PID vẫn phổ biến nhờ cấu trúc đơn giản và dễ triển khai. Tuy nhiên, các phương pháp điều khiển truyền thống bao gồm PID thường phụ thuộc mạnh vào hiệu chỉnh tham số, nhạy với nhiễu và sai số mô hình; đồng thời hiệu năng có thể suy giảm khi xuất hiện bão hòa cơ cấu chấp hành, trượt bánh, gây dao động và hiện tượng windup. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất phương án kết hợp PID cải tiến kết hợp với thuật toán Tìm kiếm chim sẻ cải tiến (ISSA) nhằm tối ưu các tham số K_p, K_i, K_d cho bài toán bám quỹ đạo. Hiệu quả phương pháp được kiểm chứng bằng mô phỏng trên quỹ đạo hình số 8 và đánh giá theo các chỉ tiêu như RMSE, sai số cực đại, mức dao động và nỗ lực điều khiển; kết quả cho thấy PID-ISSA cải thiện độ chính xác bám và độ ổn định so với các cấu hình PID cơ bản.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.1994>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Sự phát triển nhanh của tự động hóa trong logistics và vận tải đã đẩy mạnh việc ứng dụng robot di động trong các nhiệm vụ như lưu kho, giao nhận hàng hóa, giám sát tự động và phân phối nội bộ. Các đánh giá gần đây nhấn mạnh vai trò ngày càng lớn của hệ thống robot tự hành trong tối ưu hóa chuỗi cung ứng và hoạt động kho bãi, đồng thời chỉ ra nhiều thách thức nghiên cứu thực tiễn liên quan đến lập kế hoạch, điều phối và điều khiển tập hợp robot trong môi trường phức tạp [1], [2], [3].

Một bài toán trung tâm và thiết yếu trong ứng dụng trên là điều khiển bám quỹ đạo với yêu cầu chính xác và ổn định cao. Khi robot phải hoạt động trong môi trường có địa hình không bằng phẳng, nhiễu ngoại sinh, ma sát, trượt bánh và bất định mô hình, việc đảm bảo bám sát quỹ đạo mong muốn mà vẫn giữ hiệu năng động tốt là một thách thức kỹ thuật liên tục được nghiên cứu rộng rãi [4], [5], [6].

Bộ điều khiển PID do tính đơn giản, dễ cài đặt và hiệu quả với nhiều hệ thống tuyến tính gần đúng, thường được dùng làm lựa chọn tham chiếu cho điều khiển bám quỹ đạo trong robot di động [7], [8], [9]. Tuy nhiên, trong bối cảnh robot mobile hiện đại, PID đi kèm những hạn chế nổi bật: Khó chọn tham số K_p , K_i , K_d . Việc hiệu chỉnh thủ công hoặc theo các quy tắc tuyến tính thường không cho hiệu năng tối ưu trên phạm vi hoạt động rộng, đặc biệt khi hệ có phi tuyến, phụ thuộc trạng thái và có thay đổi tham số. Nhiều nghiên cứu chỉ ra nhu cầu điều chỉnh tham số một cách tự động hoặc thích nghi để đáp ứng điều kiện vận hành thay đổi [7], [8], [9]. Nhạy cảm với nhiễu và sai số mô hình. Thành phần đạo hàm trong PID khuếch đại nhiễu đo, trong khi thành phần tích phân có thể gây ra hiện tượng “tích lũy quá mức” khi cơ cấu chấp hành bão hòa, dẫn tới vọt lố và dao động kéo dài nếu không có cơ chế chống tích lũy quá mức hoặc lọc đạo hàm thích hợp [10]. Hiệu năng giảm khi có bão hòa và các ràng buộc thực thi. Trong thực nghiệm hoặc trong môi trường công nghiệp, giới hạn tín hiệu điều khiển và hiện tượng trượt/ma sát làm cho hiệu chỉnh PID truyền thống kém ổn định hoặc kém chính xác nếu không có chiến lược bù hoặc chống tích lũy quá mức. Những hạn chế này dẫn tới nhu cầu phát triển các biến thể PID cải tiến chống tích lũy quá mức, lọc đạo hàm, PID thích nghi và áp dụng phương pháp tối ưu hóa tham số tự động để đảm bảo hiệu năng trong thực tế [11].

Một hướng tiếp cận phổ biến là dùng các thuật toán tối ưu thông minh để tự động hóa việc hiệu chỉnh tham số PID, hoặc để tìm thiết kế điều khiển tối ưu trong không gian tham số lớn. Các thuật toán như PSO, GA, ACO và các thuật toán bầy đàn khác đã được áp dụng rộng rãi trong tối ưu tham số điều khiển nhờ khả năng khám phá không gian nghiệm và tránh bẫy hội tụ cục bộ. Tổng quan gần đây về các phiên bản và ứng dụng của Sparrow Search Algorithm (SSA) cho thấy SSA và các biến thể cải tiến của nó Improved Sparrow Search Algorithm (ISSA) là lựa chọn đầy hứa hẹn trong nhiều bài toán tối ưu hóa kỹ thuật do cân bằng khai phá, khai thác tốt và khả năng tinh chỉnh cục bộ mạnh mẽ [12], [13], [14], [15], [16].

Cụ thể, ISSA thường kết hợp các chiến lược như khởi tạo quần thể hỗn loạn, các bước nhảy dựa trên phân bố và cơ chế elitism để: (i) tăng tính đa dạng ban đầu, (ii) giảm nguy cơ hội tụ sớm, và (iii) cải thiện khả năng tinh chỉnh các nghiệm tốt trong giai đoạn sau. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh ISSA hiệu quả trong tối ưu tham số, lựa chọn đặc trưng và các bài toán tối ưu hóa kỹ thuật phức tạp khác [10], [15], [16]. Ưu điểm khi áp dụng ISSA cho tuning PID trong robot mobile: Khả năng tìm kiếm toàn cục, giảm rủi ro mắc kẹt tại cực trị cục bộ so với hiệu chỉnh tay hoặc phương pháp gradient. Tinh chỉnh cục bộ tốt, cho phép tối ưu cả các tiêu chí đa mục tiêu như RMSE quỹ đạo, sai số cực đại, năng lượng, và tín hiệu điều khiển. Dễ tích hợp với mô phỏng nghiệm thu gián tiếp hoặc với chiến lược trực tiếp kết hợp với điều khiển thích nghi [11], [15], [16].

Các nghiên cứu về điều khiển bám quỹ đạo đã phát triển nhiều phương pháp từ các cách tiếp cận cổ điển PID, backstepping, MPC đến các phương pháp học máy, ứng dụng tối ưu hóa phân tán [4], [6], [7], [17]. MPC được chứng minh mạnh trong xử lý ràng buộc nhưng tốn chi phí tính toán [6]; kỹ thuật backstepping và LPV được đề xuất để xử lý phi tuyến và thay đổi tham số ([5], [10], [17]). Tuy nhiên, việc lựa chọn phương pháp phù hợp còn phụ thuộc nhiều vào yêu cầu thực nghiệm như thời gian thực,

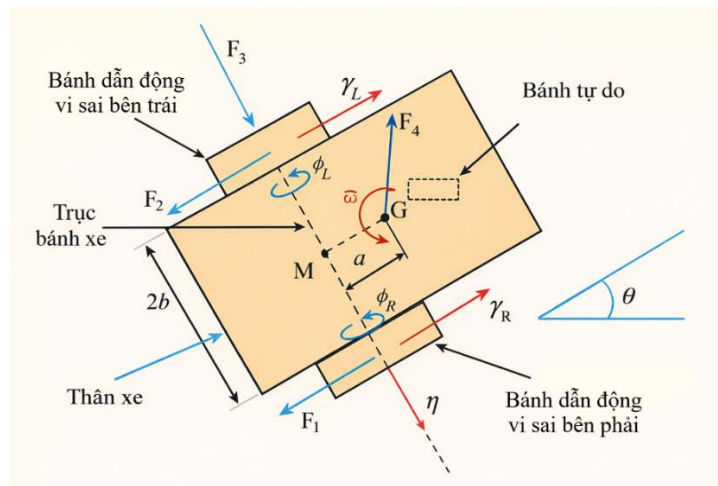
giới hạn phần cứng, nhiễu, ma sát, và nhiều công trình chỉ kiểm chứng trên bộ hàm chuẩn hoặc trường hợp lý tưởng.

Khoảng trống nghiên cứu liên quan tới ứng dụng thực nghiệm của các phương pháp lai như PID cải tiến kết hợp metaheuristic tuning trong ứng dụng logistics thực tế vẫn còn lớn: cần mô hình hóa đủ thực tế (trượt, bão hòa), chiến lược chống tích lũy quá mức hiệu quả, và đánh giá toàn diện theo nhiều tiêu chí thực nghiệm (RMSE, sai số tối đa, mức dao động, công suất). Các công trình về SSA, ISSA mới đây cung cấp bộ công cụ tối ưu hóa phù hợp để giải bài toán này [5], [13], [14], [15], [16].

Nghiên cứu đề xuất phương pháp tối ưu hiệu năng bám quỹ đạo cho robot di động bằng cách kết hợp bộ điều khiển PID cải tiến và thuật toán ISSA. Các đóng góp chính bao gồm: xây dựng mô hình động học có xét đến yếu tố bão hòa, trượt bánh, thiết kế PID chống anti-windup và lọc nhiễu, đồng thời sử dụng ISSA để tối ưu hóa tham số. Hiệu quả của phương pháp được kiểm chứng qua quỹ đạo hình số 8 với bộ tiêu chí đánh giá toàn diện.

2. Mô hình toán học của robot mobile

Việc xây dựng mô hình toán học chính xác là yêu cầu then chốt để thiết kế và tối ưu bộ điều khiển cho robot di động dẫn động vi sai. Mô hình này được thiết lập dựa trên các đặc tính động học của thân xe và bánh xe với giả thiết lăn không trượt, trong đó hai bánh chủ động được điều khiển độc lập. Về mặt vận hành, trạng thái của robot được xác định thông qua mối quan hệ giữa vận tốc hai bánh với vận tốc tổng thể: vận tốc tuyến tính là trung bình cộng vận tốc hai bánh, còn vận tốc góc tỉ lệ với chênh lệch vận tốc giữa chúng và tỉ lệ nghịch với chiều dài cơ sở của robot.



Hình 1. Mô hình robot.

Mô hình robot được minh họa ở Hình 1 và các thông số vật lý của mô hình được trình bày ở Bảng 1 được ước tính dựa trên các thông số đã làm tròn của một robot thực tế.

Bảng 1. Các thông số của robot.

Ký hiệu	Ý nghĩa vật lý	Giá trị
m_c	Khối lượng của bộ robot	25 (kg)
I_c	Mô men quán tính của bộ quanh trục đứng đi qua G	14.325 (kg·m ²)
a	Khoảng cách giữa G và M	0.18 (m)
m_w	Khối lượng mỗi bánh dẫn động	1.5 (kg)
I_w	Mô men quán tính của mỗi bánh quanh trục quay	0.002 (kg·m ²)
I_D	Mô men quán tính của mỗi bánh quanh trục đường kính	0.0045 (kg·m ²)

r	Bán kính mỗi bánh dẫn động	0.13 (m)
$2b$	Khoảng cách giữa hai bánh dẫn động (bề rộng vệt bánh)	0.5 (m)
θ	Góc hướng (yaw angle) của rô-bốt	rad
ω	Vận tốc góc quay thân rô-bốt quanh trục đứng	rad/s
ϕ_L, ϕ_R	Góc quay bánh trái, phải	rad
γ_L, γ_R	Vận tốc lăn/tiếp tuyến của bánh trái, phải	m/s
F_1, F_2, F_3, F_4	Lực tác dụng tại bánh và điểm tiếp xúc	N
η	Trục và hướng dọc thân xe trong hệ tọa độ gắn với thân	—

Mô hình động học của robot di động vi sai được xây dựng dựa trên các thông số vật lý cốt lõi gồm: khối lượng toàn bộ (thân xe và bánh dẫn động), bán kính bánh xe, chiều dài cơ sở và giới hạn vận tốc cực đại. Đây là những cơ sở quan trọng để thiết kế bộ điều khiển và thuật toán tối ưu hóa [4].

$$m_{total} = m_c + 2m_w \quad (1)$$

Trong đó: m_{total} là tổng khối lượng xe, m_c là khối lượng của bộ WMR, m_w : khối lượng mỗi bánh dẫn động.

Để mô tả chính xác động lực học của robot mobile vi sai, cần xem xét tác động của mô-men truyền từ động cơ đến bánh xe, các đặc tính quán tính, cũng như các lực cản cơ học. Theo [5], [6] phương trình chuyển động của bánh trái và bánh phải có thể được biểu diễn như sau:

$$\dot{v}_L = \frac{\tau_L}{I_w + I_D} - \frac{F_{fL}}{m_w}, \quad \dot{v}_R = \frac{\tau_R}{I_w + I_D} - \frac{F_{fR}}{m_w} \quad (2)$$

Trong đó: \dot{v}_L là tốc độ tuyến tính của bánh trái, \dot{v}_R là tốc độ tuyến tính của bánh phải, τ_L là mô men điều khiển tác động lên bánh trái, τ_R là mô men điều khiển tác động lên bánh phải, I_w là mô men quán tính mỗi bánh quanh trục quay, I_D là mô men quán tính động cơ, F_{fL} là lực cản tác dụng lên bánh trái, F_{fR} là lực cản tác dụng lên bánh phải.

Chuyển động của thân xe chịu chi phối bởi sự tổng hợp vận tốc của hai bánh. Với giả thiết không trượt lý tưởng, vận tốc tịnh tiến và góc quay của thân xe được xác định theo [3], [4]:

$$\dot{x} = v \cos(\theta), \quad \dot{y} = v \sin(\theta), \quad \dot{\theta} = \omega \quad (3)$$

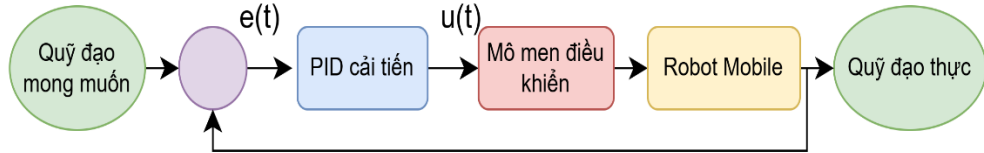
Trong đó: \dot{x} , \dot{y} là tọa độ tâm xe, v là vận tốc tịnh tiến của của xe, θ là là góc hướng của xe, ω là tốc độ góc quay của xe. Quan hệ giữa vận tốc bánh trái, phải và vận tốc tuyến tính, góc quay của xe được thiết lập như sau [4]:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}, \quad \omega = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (4)$$

Trong đó v_R là vận tốc tuyến tính của bánh phải, v_L là vận tốc tuyến tính của bánh trái, ω là vận tốc góc quay quanh trục thẳng đứng đi qua tâm xe, L là khoảng cách giữa 2 bánh xe.

3. Điều khiển cải tiến PID

Mô hình toán học từ (2) đến (4) mô tả động lực học và động học của robot, trong đó đầu vào là mô-men điều khiển τ_L, τ_R . Bộ điều khiển PID cải tiến cung cấp tín hiệu $u(t)$ để tạo ra các mô-men này, thông qua cơ cấu chấp hành được minh họa trong Hình 2. Sự kết hợp này tạo thành một vòng điều khiển kín, cho phép robot bám quỹ đạo với độ chính xác cao và ổn định.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển dùng PID cải tiến.

Trong phương trình (2) mô men điều khiển τ_L và τ_R là tín hiệu điều khiển $u(t)$ với $\tau_L = u_L(t), \tau_R = u_R(t)$ trong đó $u_L(t), u_R(t)$ là tín hiệu điều khiển riêng cho bánh trái và bánh phải, được xác định thông qua cấu trúc điều khiển PID cải tiến kết hợp với chuyển đổi vận tốc từ hệ tọa độ toàn cục sang hệ tọa độ robot như mô tả trong Hình 2.

Xây dựng quỹ đạo tham chiếu của hệ thống điều khiển là tín hiệu đặt trên Hình 2 như sau:

Quỹ đạo tham chiếu được tạo là hình số 8 với:

$$\begin{aligned} x(\varphi) &= A \cos(\varphi) \\ y(\varphi) &= \frac{B}{2} \sin(2\varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

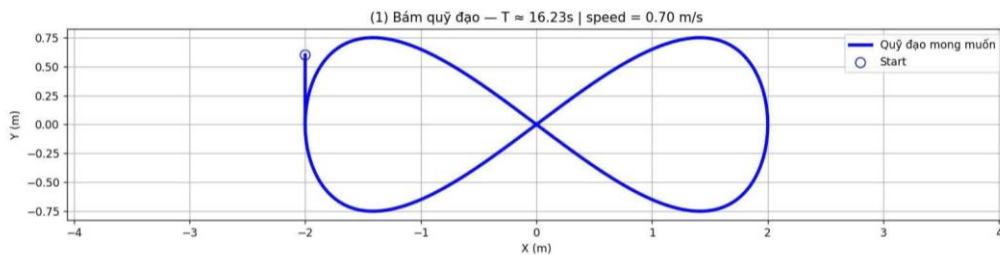
Trong đó: $A= 200\text{cm}$, $B= 150\text{cm}$ và độ dài cung:

$$s(\varphi) = \int_0^\varphi \sqrt{A^2 \sin^2(\alpha) + B^2 \cos^2(2\alpha)} d\alpha \quad (6)$$

Tham số hóa theo thời gian với vận tốc danh định v_{nom} :

$$s(t) = v_{nom}.t, \varphi(t) = s^{-1}(s(t)) \quad (7)$$

Thực hiện mô phỏng bằng ngôn ngữ Python kết quả quỹ đạo tham chiếu được minh họa như Hình 3:



Hình 3. Kết quả mô phỏng quỹ đạo tham chiếu hình số 8.

Bộ điều khiển PID truyền thống tạo tín hiệu điều khiển $u(t)$ dựa trên sai lệch bám $e(t)$ được định nghĩa là hiệu giữa quỹ đạo mong muốn và đầu ra thực tế. Trong nghiên cứu này, ký hiệu $u(t)$ được sử dụng cho tín hiệu điều khiển tác động lên động cơ. Để tránh nhầm lẫn, các đại lượng vận tốc trong phép biến đổi tọa độ được ký hiệu riêng biệt, do đó phép quay chỉ áp dụng cho vector vận tốc chứ không áp

dụng trực tiếp cho tín hiệu điều khiển. Dạng tổng quát của bộ điều khiển được biểu diễn như sau [7], [9]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

Mặc dù bộ điều khiển PID cổ điển đơn giản và hiệu quả, nhưng thường gặp phải hiện tượng tích lũy sai số tích phân và khuếch đại nhiễu trong thành phần đạo hàm. Để khắc phục, hai cải tiến được áp dụng [10] là cơ chế chống tích lũy quá mức: Tác động tích phân được giới hạn thông qua một hàm bão hòa, nhằm ngăn chặn việc tích lũy quá mức khi cơ cấu chấp hành đạt tới giới hạn.

$$I(t) = clip \left(\int_0^t e(\tau) d\tau, -\frac{I_{clip}}{K_i}, \frac{I_{clip}}{K_i} \right) \quad (9)$$

Công thức trên được sử dụng để xác định giá trị $I(t)$ bằng cách lấy tích phân của sai số $e(\tau)$ từ thời điểm 0 đến thời điểm t , sau đó giới hạn kết quả trong một khoảng cho phép. Cụ thể, trước hết ta tính giá trị cộng dồn theo thời gian $\int_0^t e(\tau) d\tau$. Tiếp theo, hàm clip() sẽ ghim giá trị này trong khoảng

$\left[-\frac{U_{iup}}{K_i}, \frac{U_{iup}}{K_i} \right]$: nếu tích phân nhỏ hơn cận dưới thì $I(t)$ được gán bằng cận dưới, nếu lớn hơn cận trên thì

$I(t)$ được gán bằng cận trên, còn nếu nằm trong khoảng thì giữ nguyên giá trị tính được. Nhờ đó, $I(t)$ luôn nằm trong giới hạn định trước, tránh trường hợp giá trị tích phân tăng hoặc giảm quá lớn theo thời gian.

Và cơ chế lọc đạo hàm nhằm giảm ảnh hưởng của nhiễu tần số cao, thành phần đạo hàm được bổ sung một bộ lọc thông thấp bậc nhất:

$$D_f(t) = D_f(t-1) + \alpha \left(\frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} - D_f(t-1) \right) \quad (10)$$

Với: $\alpha = d_\alpha$

Khi đó (8) được tính:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i I(t) + K_d D_f(t) \quad (11)$$

Tín hiệu điều khiển $u(t)$ từ (11) là đầu vào của mô hình động lực học bánh xe trong (2). Như vậy $u(t)$ trong Hình 2 được chuyển đổi thành các mô-men điều khiển τ_L và τ_R thông qua mô hình động cơ và cơ cấu truyền động. Trình tự tín hiệu điều khiển có thể được mô tả theo 5 bước như sau:

B1: Tính sai số $e(t)$ giữa quỹ đạo tham chiếu và quỹ đạo thực tế.

B2: PID cải tiến (11) xử lý $e(t)$ để tạo ra tín hiệu điều khiển $u(t)$.

B3: Chuyển đổi sang mô-men τ_L, τ_R thông qua mô hình động cơ và bánh xe.

B4: Động lực học bánh (2) sử dụng τ_L, τ_R để điều khiển vận tốc bánh v_L, v_R

B5: Động học robot (3) – (4) chuyển đổi v_L, v_R thành vận tốc toàn cục v, ω , từ đó điều khiển robot bám quỹ đạo.

Trong hệ thống điều khiển robot di động vi sai, bộ điều khiển PID được sử dụng để điều chỉnh vận tốc và hướng di chuyển dựa trên sai số giữa quỹ đạo tham chiếu và quỹ đạo thực tế. Trước hết, ta biểu

diễn vận tốc trong hệ tọa độ gắn với robot, bao gồm thành phần vận tốc tiến $v_{forward}$ và vận tốc ngang $v_{lateral}$ được xác định theo góc định hướng θ như sau:

$$\begin{aligned} v_{forward} &= \cos \theta u_x + \sin \theta u_y \\ v_{lateral} &= -\sin \theta u_x + \cos \theta u_y \end{aligned} \quad (12)$$

Dựa trên các thành phần vận tốc này, lệnh điều khiển cuối cùng cho vận tốc tuyến tính v_{cmd} và vận tốc góc ω_{cmd} được tính toán bằng cách kết hợp với tín hiệu hiệu chỉnh từ bộ điều khiển PID và được giới hạn trong phạm vi vận tốc cực đại của robot như:

$$\begin{aligned} v_{cmd} &= clip(v_{forward}, -v_{max}, v_{max}) \\ \omega_{cmd} &= clip\left(u_h + \frac{2v_{lateral}}{L}, -\omega_{max}, \omega_{max}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó, u_h là tín hiệu PID cho sai số hướng, v_L, v_R là vận tốc của hai bánh xe trái và phải được suy ra từ vận tốc tuyến tính v_{cmd} và vận tốc góc ω_{cmd} có tính đến chiều dài cơ sở L của xe. Quan hệ này được mô tả trong (14), phản ánh động học vi sai cơ bản của robot di động.

$$\begin{aligned} v_L &= v_{cmd} - \frac{L}{2} \omega_{cmd} \\ v_R &= v_{cmd} + \frac{L}{2} \omega_{cmd} \end{aligned} \quad (14)$$

Để đảm bảo robot bám theo quỹ đạo tham chiếu, cần xác định sai số điều khiển tại mỗi thời điểm t . Sai số theo trục x và y (e_x, e_y) được tính bằng chênh lệch giữa vị trí tham chiếu và vị trí thực tế của robot như (15).

$$e_x = x_{ref}(t) - x(t), \quad e_y = y_{ref}(t) - y(t) \quad (15)$$

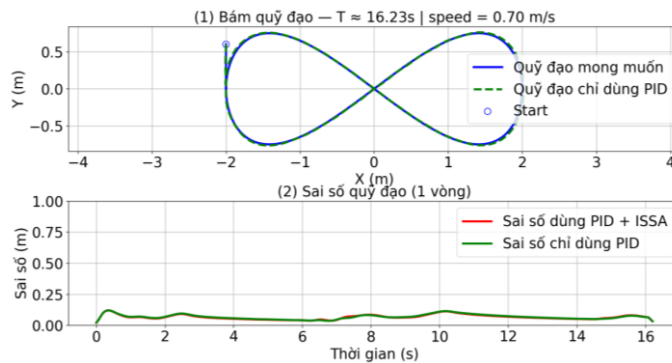
Từ đó, sai số Euclid $e(t)$ được xác định theo (16) biểu thị khoảng cách từ robot đến điểm tham chiếu tại thời điểm hiện tại.

$$e(t) = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (16)$$

Đồng thời, sai số về hướng chuyển động θ được tính toán dựa trên góc phương vị giữa vị trí hiện tại và vị trí mục tiêu, được mô tả:

$$e_\theta = wrap(\arctan 2(e_y, e_x) - \theta) \quad (17)$$

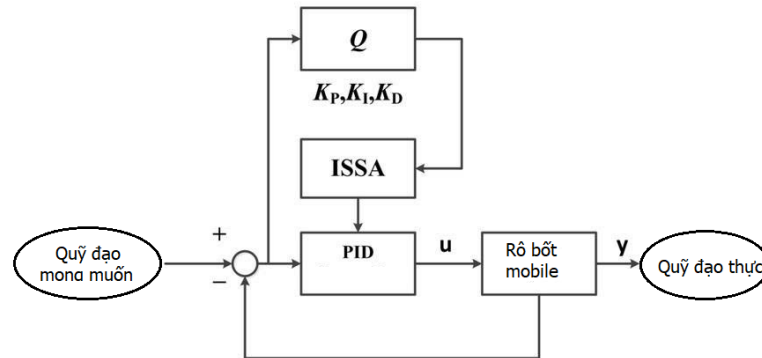
Thực hiện mô phỏng hệ thống điều khiển robot di động dùng bộ điều khiển PID, quỹ đạo chuyển động của rô bốt bám với quỹ đạo mong muốn được minh họa như Hình 4.



Hình 4. Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động của robot sử dụng PID.

4. Thuật toán ISSA tối ưu PID

Thuật toán ISSA mô phỏng hành vi tập thể của đàn chim sẽ để cân bằng giữa khám phá và khai thác không gian tìm kiếm [15], [16]. So với SSA gốc, ISSA tích hợp các cơ chế cải tiến nhằm tối ưu hóa hiệu suất: học dựa trên nghiệm đối nghịch giúp đa dạng hóa quần thể và tránh cực trị cục bộ [13]; cơ chế ưu tú bảo toàn nghiệm tốt nhất [16]; chiến lược thu hẹp biên tìm kiếm giúp đẩy nhanh hội tụ toàn cục [14]; và bước làm mịn cục bộ giúp tinh chỉnh độ chính xác lời giải [13]. Trong kiến trúc đề xuất, ISSA được dùng để tìm bộ thông số PID tối ưu qua mô phỏng ngoại tuyến, làm cơ sở cho việc điều khiển bám quỹ đạo thời gian thực. Kiến trúc điều khiển đề xuất tích hợp PID cải tiến với tối ưu hóa ISSA được minh họa trên Hình 5.



Hình 5. Kiến trúc điều khiển đề xuất tích hợp PID cải tiến với tối ưu hóa ISSA.

Phương pháp lai này đảm bảo tính khả thi trong triển khai thực tế và nâng cao hiệu năng so với các cách tinh chỉnh PID thông thường. Để tối ưu hóa, thuật toán ISSA thực hiện cơ chế cân bằng giữa khai phá toàn cục và khai thác cục bộ, bắt đầu bằng việc khởi tạo quần thể nghiệm ngẫu nhiên trong giới hạn $[LB, UB]$ nhằm đảm bảo độ đa dạng và tính phân tán ban đầu.

$$X_i^{(0)} = lb + U_i \cdot (ub - lb) \quad (18)$$

Với $U_i \sim U(0,1)$ Cơ chế học đối nghịch được áp dụng để tạo ra nghiệm đối nghịch so với các nghiệm hiện tại, từ đó tăng cường khả năng khám phá không gian tìm kiếm và tránh rơi vào cực trị địa phương:

$$X_i^{opp} = lb + (1 - U_i) \cdot (ub - lb) \quad (19)$$

Để tăng cường chất lượng nghiệm, ISSA triển khai hai cơ chế khai thác cục bộ. Thứ nhất là khai phá quanh nghiệm tốt nhất trong đó các cá thể di chuyển quanh vị trí tốt nhất hiện tại với một nhiễu Gaussian có điều chỉnh nhằm tinh chỉnh nghiệm:

$$X_i^{(t+1)} = X_{best}^{(t)} + N(0, \sigma_g) \cdot (ub_{loc} - lb_{loc}) \quad (20)$$

Thứ hai là hướng tới nghiệm tốt nhất tức là các cá thể sẽ dịch chuyển dần về phía nghiệm tốt nhất trong quần thể, kết hợp với yếu tố ngẫu nhiên để duy trì tính đa dạng:

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + r(X_{best}^{(t)} - X_i^{(t)}) + N(0, \sigma_l) \quad (21)$$

Hàm mục tiêu được xây dựng nhằm phản ánh chất lượng bám quỹ đạo của hệ thống điều khiển:

$$J = (6 - 2\omega) \cdot RMSE + (2 - 1.5\omega) \cdot MaxE + (1 - 0.5\omega) \cdot Osc + 0.5 \cdot Jerk + 0.15 \cdot Eff + 3 \cdot SatPen \quad (22)$$

Trong đó: Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm sai số trung bình bình phương gốc (RMSE), sai số cực đại, số lần dao động, độ giật, nỗ lực điều khiển và tỉ lệ bão hòa tín hiệu điều khiển. Từ đó, ISSA có thể tối ưu đồng thời nhiều tiêu chí để đạt được bộ tham số PID cho đáp ứng nhanh, chính xác và ổn định hơn.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e(t_i)^2} \quad (23)$$

Sai số cực đại:

$$MaxE = \max_i e(t_i) \quad (24)$$

Jerk:

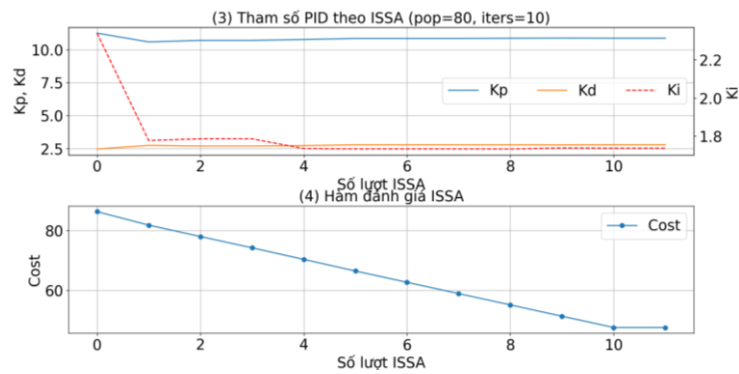
$$Jerk = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |e(t_{i+1}) - e(t_i)| \quad (25)$$

Effort:

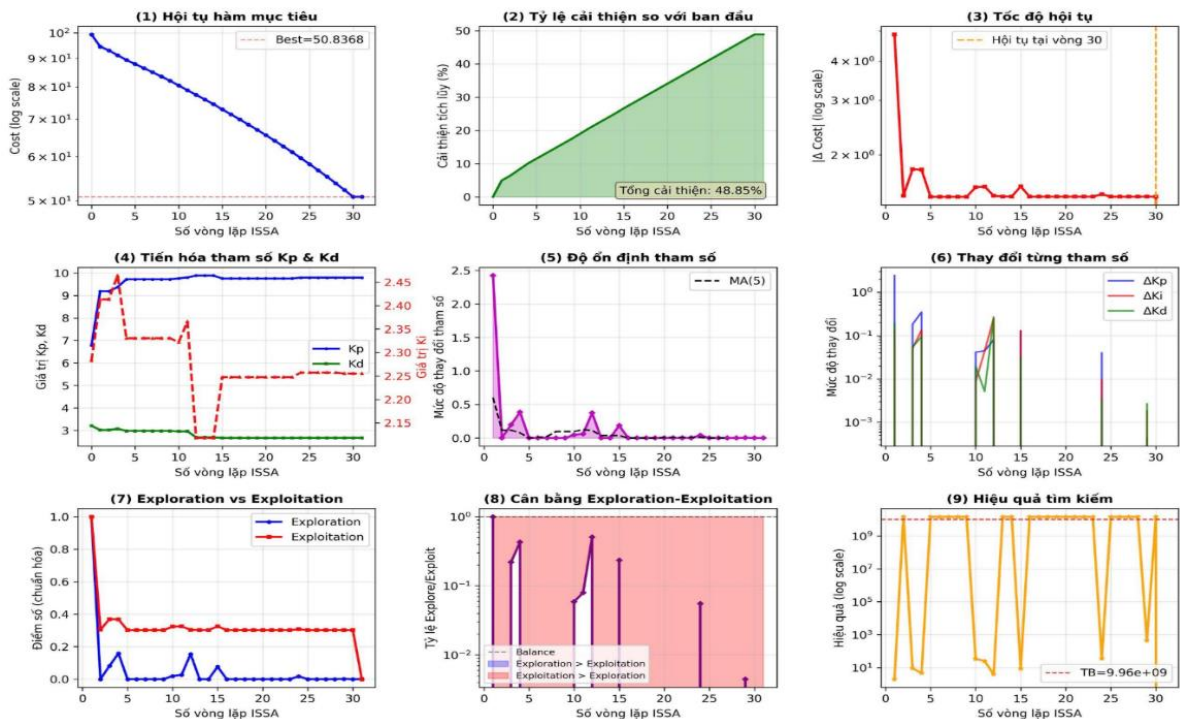
$$Eff = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|u_x| + |u_y|}{2} \quad (26)$$

SatPen: tỉ lệ mẫu lệnh bị bão hòa

$$\omega = \frac{iteration}{max_iters} : \text{hệ số annealing} \quad (27)$$



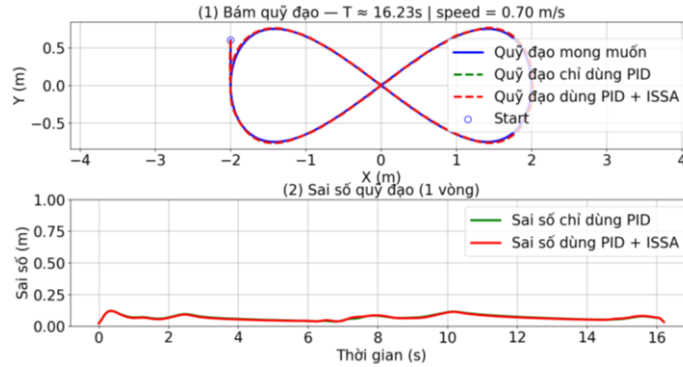
Hình 6. Kết quả mô phỏng giá trị tham số PID được tối ưu bởi ISSA.



Hình 7. Phân tích quá trình hội tụ và hiệu quả tìm kiếm của ISSA.

Hình 6 và Hình 7 minh họa quá trình tối ưu hóa bộ tham số PID bằng thuật toán ISSA (pop = 80, iters = 10). Các tham số K_p , K_i , K_d biến thiên và dần ổn định ở các vòng lặp cuối, cho thấy thuật toán đã hội tụ về vùng nghiệm tối ưu. Đồng thời, đường hội tụ của hàm mục tiêu cost được xây dựng từ các tiêu chí như RMSE, nỗ lực điều khiển và mức phạt bão hòa giảm mạnh và đi ngang ở giá trị xấp xỉ 50.84 cải thiện ~48.85% so với ban đầu. Kết quả phân tích cho thấy ISSA có tốc độ hội tụ nhanh, khả năng tinh chỉnh nghiệm chính xác và duy trì sự cân bằng giữa khám phá – khai thác, giúp hệ thống bám quỹ đạo ổn định và giảm thiểu sai số hiệu quả.

Thực hiện mô phỏng hệ thống điều khiển robot di động dùng bộ điều khiển PID được tối ưu tham số bởi ISSA, quỹ đạo chuyển động của rô bốt bám với quỹ đạo mong muốn được minh họa như Hình 8.



Hình 8. So sánh kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động của robot điều khiển bởi PID và PID – ISSA.

Nhờ sự kết hợp giữa các cơ chế khởi tạo ngẫu nhiên, học đối nghịch, khai phá quanh nghiệm tốt và hướng tới nghiệm tốt, ISSA có khả năng cải thiện tốc độ hội tụ và đạt được nghiệm tối ưu có độ tin cậy cao. Các kết quả mô phỏng trong Hình 4 và Hình 8 được đánh giá tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các tiêu chí điều khiển khi dùng bộ điều khiển PID và ISSA-PID.

Tiêu chí	PID	ISSA-PID	Cải thiện (%)
RMSE (m)	0.052	0.041	21.7%
MaxE (m)	0.085	0.078	8.3%
Dao động	Cao	Thấp	Giảm nhẹ
Cost function J	1.000	0.327	67.3%

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, một bộ điều khiển PID được tối ưu bằng giải thuật ISSA đã được xây dựng và áp dụng cho hệ thống xe mobile vi sai. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp ISSA-PID mang lại độ chính xác bám quỹ đạo cao hơn đáng kể so với PID điều chỉnh thủ công, thể hiện qua việc giảm sai số trung bình RMSE, sai số cực đại MaxE và độ dao động trong quá trình điều khiển. Đồng thời, bộ điều khiển tối ưu này còn giúp hệ thống đạt được sự hội tụ nhanh và ổn định hơn. Các kết quả đạt được cho thấy giải pháp ISSA-PID hoàn toàn khả thi để ứng dụng vào thực tiễn, đặc biệt trong các hệ thống robot logistics, phương tiện vận tải tự động và xe AGV, nơi yêu cầu khả năng bám quỹ đạo chính xác và vận hành ổn định. Kết quả nghiên cứu cho thấy hoàn toàn phát triển tốt khi thử nghiệm trên mô hình thực tế, nhằm kiểm chứng khả năng ứng dụng trong môi trường có nhiễu và sai số cảm biến. Hoặc mở rộng sang điều khiển bền vững để đảm bảo tính ổn định trước sự thay đổi tham số và nhiễu động bên ngoài.

Với những đóng góp này, nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng của việc tích hợp tối ưu thông minh ISSA trong thiết kế bộ điều khiển hiện đại, hướng tới các ứng dụng robot.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, "Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 294, no. 2, pp. 405–426, 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.

- [2] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, "Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective," *Swarm Intell.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, 2013, doi: 10.1007/s11721-012-0075-2.
- [3] M. Deremetz, R. Lenain, A. Couvent, C. Cariou, and B. Thuilot, "Path tracking of a four-wheel steering mobile robot: A robust off-road parallel steering strategy," in *Proc. Eur. Conf. Mobile Robots (ECMR)*, 2017, pp. 1–7, doi: 10.1109/ECMR.2017.8098670.
- [4] J. Tao, D. Lu, Q. Wang, Y. Qiu, H. Chen, and L. Chen, "A review on tracking control of nonholonomic mobile robots," in *Proc. IEEE Int. Conf. Inf. Autom. (ICIA)*, 2018, pp. 1464–1469, doi: 10.1109/ICInfA.2018.8812488.
- [5] H. Ye and S. Wang, "Trajectory tracking control for nonholonomic wheeled mobile robots with external disturbances and parameter uncertainties," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 18, no. 12, pp. 3015–3022, 2020, doi: 10.1007/s12555-019-0643-y.
- [6] J. J. Zhang, Z. L. Fang, Z. Q. Zhang, R. Z. Gao, and S. B. Zhang, "Trajectory tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots using model predictive control subjected to Lyapunov-based input constraints," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 20, pp. 1640–1651, 2022, doi: 10.1007/s12555-019-0814-x.
- [7] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 9, no. 4, pp. 589–600, 1998, doi: 10.1109/72.701173.
- [8] H. R. Karimi and A. Benallegue, "PID-based trajectory tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 289–296, 2010.
- [9] J. H. Park, D. H. Kim, and B. H. Lee, "Experimental evaluation of PID-type heading controllers for mobile robots," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 609–618, 2001.
- [10] M. Sabouri and M. H. Asemani, "LPV controller design for trajectory tracking of non-holonomic wheeled mobile robots in the presence of slip," in *Proc. 29th Iranian Conf. Electr. Eng. (ICEE)*, 2021, pp. 715–720, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544327.
- [11] Y. Li and Q. Xu, "Adaptive robust PID control of a mobile wheeled inverted pendulum," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 21, no. 5, pp. 2356–2367, 2016.
- [12] M. A. Awadallah, M. A. Al-Betar, I. A. Doush, S. N. Makhadmeh, and G. Al-Naymat, "Recent versions and applications of sparrow search algorithm," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 30, no. 5, pp. 2831–2858, 2023, doi: 10.1007/s11831-023-09887-z.
- [13] J. Xue and B. Shen, "A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm," *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 22–34, 2020, doi: 10.1080/21642583.2019.1708830.
- [14] J. Xue and B. Shen, "A survey on sparrow search algorithms and their applications," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 55, no. 5, pp. 814–832, 2024, doi: 10.1080/00207721.2023.2293687.
- [15] J. Jia, S. Yuan, Y. Shi, J. Wen, X. Pang, and J. Zeng, "Improved sparrow search algorithm optimization deep extreme learning machine for lithium-ion battery state-of-health prediction," *iScience*, vol. 25, no. 4, Art. no. 103988, 2022, doi: 10.1016/j.isci.2022.103988.
- [16] Z. Wang, X. Huang, and D. Zhu, "A multistrategy-integrated learning sparrow search algorithm and optimization of engineering problems," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2022, Art. no. 2475460, 2022, doi: 10.1155/2022/2475460.
- [17] M. J. Rabbani and A. Y. Memon, "Trajectory tracking and stabilization of nonholonomic wheeled mobile robot using recursive integral backstepping control," *Electronics*, vol. 10, no. 16, Art. no. 1992, 2021, doi: 10.3390/electronics10161992.

Thi-Minh-Tam Le is currently a Lecturer with the Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Hung Yen University of Technology and Education, Vietnam.

Email: leminhtamutehy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5147-5370>.

Thanh-Hai Pham is with Faculty Electrical and Electronic Engineering, Hung Yen University of Technology and Education. Tel: 0825574407.

Email: haipt.utehy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2206-7463>.

Duc-Hung Pham is also a Lecturer with Faculty Electrical and Electronic, Hung Yen University of Technology and Education, Vietnam.

Email: duchung.pham@utehy.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3344-1593>.

Viet-Ngu Nguyen is currently a Lecturer with the Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Hung Yen University of Technology and Education, Vietnam.

Email: ngunguyenviet77@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6012-4846>.

Ngoc-Thang Pham is with Faculty Electrical and Electronic Engineering, Hung Yen University of Technology and Education. Tel: 0912287247.

Email: phamngocthangutehy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1107-8965>.