การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การออกแบบตัวควบคุม PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

Optimal PI-PD Controller Design for Two-Wheel Self-Balancing Robot via Flower Pollination Algorithm

ณธรรม เกิดสำอางค์[1] ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม[2] สุธี รุกขพันธุ์[3] และ เชิงชาย สมประชา[3*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต nathum.koe@kbu.ac.th
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต theerayut.jan@kbu.ac.th
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ cherngchai.som@rmutr.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ซึ่งเป็นวิธีการแบบอภิศึกษาสำนึกสำหรับหาผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพสูง การออกแบบตัวควบคุม PI-PD จะกำหนดจากปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข โดยค่า K_P, K_I, K_D และ K_{PF} จะถูกค้นหาด้วยวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากผลการจำลองพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PI-PD สามารถหาได้ด้วยวิธีการผสมเกสรดอกไม้อย่างมีประสิทธิภาพ และตัวควบคุมแบบ PI-PD ที่นำเสนอให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ

คำสำคัญ: ตัวควบคุม PI-PD หุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้

Abstract

This paper presents an optimal PI-PD controller design for the two-wheel self-balancing robot via flower pollination algorithm (FPA), the most efficient metaheuristic optimization method. The an optimal PI-PD controller design is based on constrained optimization problem. K_P, K_I, K_D and K_{PF} are searched by the FPA to minimize the objective function under inequality constraints. From simulation results, the optimal PI-PD parameters are obtained by the FPA. The proposed PI-PD controller can give better response than the parallel PID controller for the two-wheel self-balancing robot.

Keywords: PI-PD Controller, Two-Wheel Self-Balancing Robot, Flower Pollination Algorithm

1. บทนำ

ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ (two-wheel self-balancing robot, TWSBR) เป็นพลานต์ที่ถูกสนใจอย่างมากในการศึกษาและควบคุมในหลายปีที่ผ่านมา [1-2] หุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อนั้นมีพื้นฐานมาจากระบบเพนดูลัมผกผันที่ตั้งอยู่บนล้อซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ [3-4] การรักษาสมดุลของหุ่นยนต์จำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมที่เหมาะสม ระบบควบคุมที่ถูกนำมาใช้ในควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ เช่น ระบบควบคุม LQR (linear quadratic regulator) และระบบควบคุม PID (proportional integral derivative) [1] เป็นต้น ตัวควบคุม PID ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม จึงถูกนำมาใช้ออกแบบในการรักษาสมดุลของหุ่นยนต์ เนื่องจากมีโครงสร้างของระบบควบคุมไม่สลับซับซ้อน [5] อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม ที่มีโครงสร้างของระบบควบคุมแบบขนาน นั้นก่อให้เกิดค่าพุ่งเกินขนาดใหญ่และเวลาเข้าที่ช้า เมื่อนำมาใช้ควบคุมระบบไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ [6]

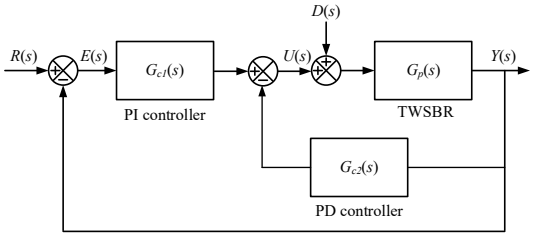
ตัวควบคุม PI-PD สามารถให้สมรรถนะการควบคุมที่สูงกว่าตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิมสำหรับการควบคุมระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ การออกแบบตัวควบคุม PI-PD โดยการพิจารณาเป็นปัญหาการหาค่าหมาะสมที่สุด (optimization problem) และค้นหาคำตอบด้วยวิธีอภิศึกษาสำนึก (metaheuristic method) ถูกนำเสนออย่างกว้างขวาง [7] ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) เป็นหนึ่งในวิธีอภิศึกษาสำนึกที่มีประสิทธิภาพสูง [8] FPA สามารถลู่เข้าหาผลเฉลยวงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วเมื่อเทียบกับการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO)[9]

ดังนั้นบทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อและโครงสร้างตัวควบคุม PI-PD ถูกอธิบายในส่วนที่ 2 หลักการขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ถูกอธิบายในส่วนที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม PI-PD ด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้และผลการจำลอง ซึ่งกระบวนการทำผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงในส่วนที่ 4 และส่วนสุดท้ายคือสรุปผล

2. ระบบควบคุม PI-PD สำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับรักษาดุลยภาพของหุ่นยนต์สองล้อด้วยตัวควบคุมแบบ PI-PD แสดงดังรูปที่ 1 โดยที่ $G_{c1}(s)$ $G_{c2}(s)$ และ $G_p(s)$ คือ ตัวควบคุม PI ตัวควบคุม PD และ พลานต์ของแบบจำลองหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ ตามลำดับ

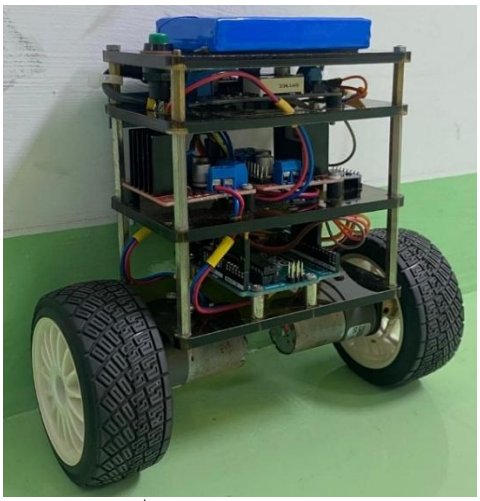
*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ



รูปที่ 1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ

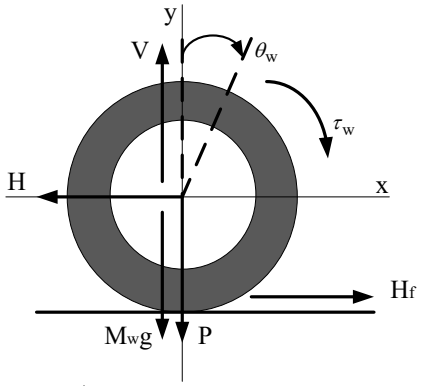
2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ

หุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อประกอบด้วยแชสซีของหุ่นยนต์ (chassis) แสดงพฤติกรรมเสมือนอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ถูกวางอยู่บนล้อสองล้อ ซึ่งล้อทั้งสองถูกเชื่อมต่อด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ [2] โดยหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ แสดงดังรูปที่ 2 การรักษาดุลยภาพของหุ่นยนต์สองล้อทำได้โดยการเคลื่อนที่ของล้อทั้งสองตามคำสั่งของตัวควบคุม ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อได้จาก แบบจำลองของล้อของหุ่นยนต์ แชสซีของหุ่นยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2 หุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ

แบบจำลองการเคลื่อนที่ล้อของหุ่นยนต์สามารถอธิบายได้จากแผนภาพอิสระ (free body diagram) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพอิสระของล้อหุ่นยนต์

ผลรวมของแรงของล้อหุ่นยนต์ในแนวแกน x สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1) และผลรวมของแรงบิดที่จุดศูนย์กลางล้อหุ่นยนต์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

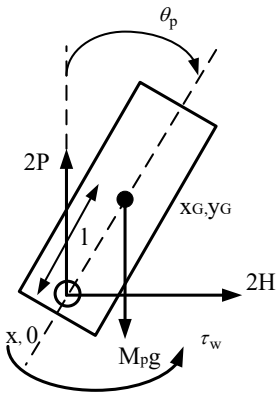
$$M_w\ddot{x} = H_f - H \tag{1}$$

$$J_w\ddot{\theta}_w = \tau_w - H_f r \tag{2}$$

เมื่อการเคลื่อนที่ของล้อไม่มีการลื่นไถลจะพบว่า $x = \theta_w r$ จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถเขียนแบบจำลองของล้อทั้งสองล้อได้ดังสมการที่ (3)

$$(2M_w + \frac{2J_w}{r})\ddot{x} = \frac{2\tau_w}{r} - 2H \tag{3}$$

แบบจำลองแชสซีของหุ่นยนต์สามารถอธิบายได้จากแผนภาพอิสระ (free body diagram) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพอิสระของแชสซีหุ่นยนต์

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแชสซีหุ่นยนต์ (x_G, y_G)แสดงได้ดังสมการ (4)

$$x_G = x + l\sin\theta_p;\ \ y_G = l\cos\theta_p \tag{4}$$

ผลรวมของแรงของแชสซีหุ่นยนต์ในแนวแกน x สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5) และผลรวมของแรงของแชสซีหุ่นยนต์ในแนวแกน y สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$M_p(\ddot{x} + l\ddot{\theta}_p\cos\theta_p - l\dot{\theta}_p^2\sin\theta_p) = 2H \tag{5}$$

$$M_p(l\sin\theta_p\ddot{\theta}_p + l\cos\theta_p\dot{\theta}_p^2) = M_p g - 2P \tag{6}$$

ผลรวมของแรงบิดที่จุดศูนย์ถ่วงของแชสวีของหุ่นยนต์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$J_p\theta_p = 2Pl\sin\theta_p - 2Hl\cos\theta_p - 2\tau_w \tag{7}$$

ดังนั้นจากสมการข้างต้นสามารถเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$(M_p + 2M_w + \frac{2J_w}{r^2})\ddot{x} = -M_p l\ddot{\theta}_p\cos\theta_p + M_p l\dot{\theta}_p^2\sin\theta_p + \frac{2\tau_w}{r} \tag{8}$$

$$(J_p + M_p l^2)\ddot{\theta}_p = M_p gl\sin\theta_p - M_p l\ddot{x}\cos\theta_p - 2\tau_w \tag{9}$$

แรงบิดที่ล้อของหุ่นยนต์สร้างมาจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [5] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10)

$$\tau_w = \frac{K_m V_a}{R_a} - \frac{K_m K_e\dot{x}}{R_a r} \tag{10}$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ในสมการที่ (8) (9) และ (10) ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (11) และ (12) [5]

$$(M_p + 2M_w + \frac{2J_w}{r^2})\ddot{x} = M_p l\ddot{\theta} + \frac{2K_m}{R_a r}V_a - \frac{2K_m K_e}{R_a r^2}\dot{x} \quad (11)$$

$$(J_p + M_p l^2)\ddot{\theta} = M_p g l\theta + M_p l\ddot{x} - \frac{2K_m}{R_a}V_a + \frac{2K_m K_e}{R_a r}\dot{x} \quad (12)$$

สมการปริภูมิสถานะ (state space) ของระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ ได้รับจากสมการที่ (11) และ (12) ดังสมการที่ (13) [5]

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\\ \dot{\theta}\\ \ddot{\theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & A_{22} & A_{23} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & A_{42} & A_{43} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \theta\\ \dot{\theta}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ B_{21}\\ 0\\ B_{41}\end{bmatrix}V_a \quad (13)$$

โดยที่

$$A_{22} = \frac{2K_m K_e(M_p l r - J_p - M_p l^2)}{R_a r \alpha} \qquad A_{23} = \frac{M_p^2 g l^2}{\alpha}$$

$$A_{42} = \frac{2K_m K_e(r\beta - M_p l)}{R_a r^2 \alpha} \qquad A_{43} = \frac{M_p g l \beta}{\alpha}$$

$$B_{21} = \frac{2K_m(J_p - M_p l^2 - M_p l r)}{R_a r \alpha} \qquad B_{41} = \frac{2K_m(M_p l - r\beta)}{R_a r \alpha}$$

$$\beta = (2M_w + 2J_w / r + M_p) \qquad \alpha = J_p\beta + 2M_p l^2(M_w + J_w / r)$$

2.2 ตัวควบคุม PI-PD

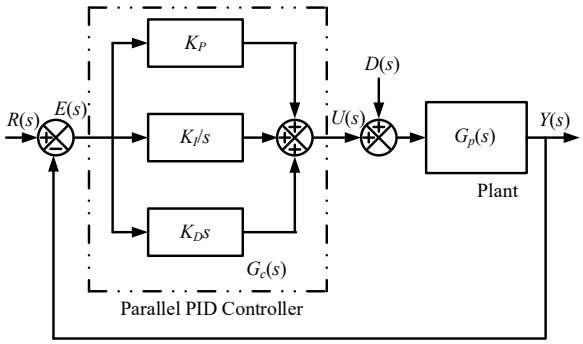
ตัวควบคุม PID โดยทั่วไปที่ถูกใช้ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นตัวควบคุม PID แบบขนาน โครงสร้างตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 5 สัญญาณควบคุม, $u(t)$ เกิดจากผลรวมของ ค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_P คูณกับสัญญาณความคลาดเคลื่อน, $e(t)$ ค่าอัตราขยายเชิงอินทิเกรต, K_I คูณกับผลรวมสัญญาณความคลาดเคลื่อน ($\int e(t)dt$) และค่าอัตราขยายเชิงอนุพันธ์, K_D คูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณความคลาดเคลื่อน $de(t)/dt$ แสดงดังสมการที่ (14)

$$u(t)\big|_{PID} = K_P e(t) + K_I\int e(t)dt + K_D\frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

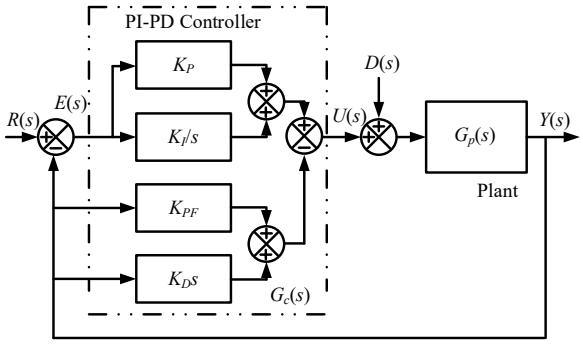
ตัวควบคุม PI-PD ถูกปรับมาจากตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก โครงสร้างตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 6 สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PI-PD แสดงดังสมการที่ (15) [7]

ตัวควบคุม PI-PD ประกอบด้วย ส่วนของอัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_{PF} และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์, K_D ถูกวางเป็นวงรอบป้อนกลับ (feedback loop) ด้านในที่รับสัญญาณเอาต์พุต, $y(t)$ ระบบที่ไม่มีเสถียรภาพจะกลายเป็นระบบที่มีเสถียรภาพจากส่วนนี้ และส่วนของอัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_P และอัตราขยายเชิงอินทิเกรต, K_I ถูกวางเป็นวงรอบไปข้างหน้าที่ (forward loop) รับสัญญาณความคลาดเคลื่อน, $e(t)$ เพื่อควบคุม-พลานต์ที่มีเสถียรภาพแล้ว ซึ่งตัวควบคุม PI-PD สามารถตอบสนองได้อย่างดีเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

$$u(t)\big|_{PI-PD} = \left[K_P e(t) + K_I\int e(t)dt\right] - \left[K_{PF}\,y(t) + K_D\frac{dy(t)}{dt}\right] \quad (15)$$



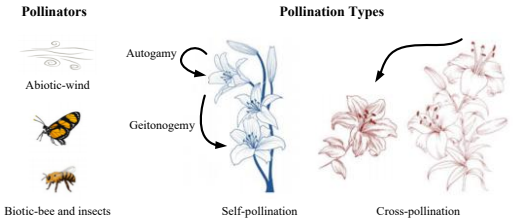
รูปที่ 5 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดตัวควบคุม PID



รูปที่ 6 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดตัวควบคุม PI-PD

3. ขั้นตอนวิธีผสมเกสรดอกไม้ (FPA)

ขั้นตอนวิธี FPA เป็นขั้นตอนวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อยู่บนแนวคิดกระบวนการผสมเกสรของพืชดอกนำเสนอในปี ค.ศ. 2012 โดย Xin-She Yang การผสมเกสรดอกไม้แบ่งเป็น 2 แบบ การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน (self-pollination) และการผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้น (cross-pollination) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แนวคิดผสมเกสรของพืชดอกนำเสนอโดย Xin-She Yang [9]

1.การผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้น เป็นผสมเกสรดอกไม้ต่างต้นที่มีระยะทางไกลกัน ผ่านตัวขนถ่ายละอองเรณู (pollinators) แบบเป็นสิ่งมีชีวิต เช่น ผึ้ง ผีเสื้อ เป็นต้น และแบบไม่มีชีวิต เช่น น้ำ ลม เป็นต้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวขนถ่ายละอองเรณูจะเคลื่อนที่แบบ Lévy flights ดังนั้นการหาผลเฉลยใหม่จากการผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้นหรือการผสมเกสรแบบวงกว้าง แสดงได้ดังสมการที่ (16) เมื่อ x_i ผลเฉลยปัจจุบัน g^* ผลเฉลยที่ดีที่สุด และ L คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเลวี (Lévy distribution)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*) \quad (16)$$

2.การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน คือการผสมเกสรที่เกิดขึ้นภายในดอกเดียวกันหรือคนละดอกแต่อยู่ภายในต้นเดียวกัน การหาผลเฉลยใหม่จากการผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกันหรือการผสมเกสรแบบเฉพาะที่ แสดงดังสมการที่ (17) เมื่อ x_j และ x_k คือ 2 ค่าผลเฉลยที่ได้รับการสุ่มจากกลุ่มประชากรเดียวกับ x_i และ ε คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (17)$$

ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยน (switch probability) $p \in [0,1]$ ใช้สำหรับการเลือกรูปแบบการผสมเกสร ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่า p เป็นจริง การค้นหาผลเฉลยใหม่ในกรณีนี้ใช้การผสมเกสรแบบวงกว้างตามสมการที่ (16) แต่ถ้าเป็นเท็จ การค้นหาผลเฉลยใหม่ใช้การผสมเกสรแบบเฉพาะที่ตามสมการที่ (17) ขั้นตอนการค้นหาคำตอบแบบ FPA สามารถแสดงดังรูปที่ 8 [9]

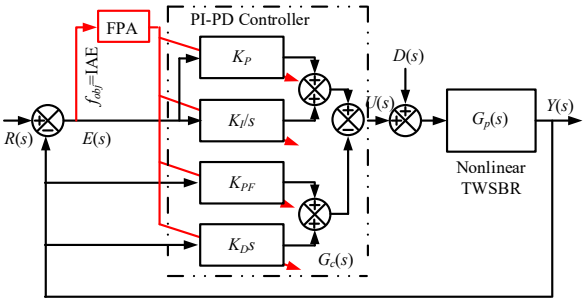
```
begin
  Objective min or max f(x) of solution x = (x1, …, xd)
  Initial a population of n flower/pollen gametes with random solutions
  Find the best solution g* in initial population
  Define a switch proability p ∈[0,1]
  while (Gen < Max_Gen) or (stop criterion)
    for i = 1:n (all n flowers in the population)
      if rand < p,
        Draw a (d-dimensional) step vector L which obey a Lévy distribution
        Global pollination via (16)
      else
        Draw ε from a uniform distribution in [0,1]
        Randomly choose j and k among all the solutions
        Local pollination via (17)
      end if
      Evaluate new solutions
      If new solutions are better, update them in the population
    end for
      Find the current best solution g*
  end while
end
```

รูปที่ 8 รหัสเทียมขั้นตอนวิธีผสมเกสรดอกไม้[9]

4. การออกแบบตัวควบคุม PI-PD และผลการจำลอง

การออกแบบตัวควบคุม PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อด้วยขั้นตอนวิธีผสมเกสรดอกไม้ แสดงดังรูปที่ 9 โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_{obj} เป็นผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (integral absolute error: IAE) ระหว่างสัญญาณมุมของตัวหุ่นยนต์อ้างอิง $r(t)$ และสัญญาณมุมของตัวหุ่นยนต์จริง $y(t)$ ค่าอัตราขยาย K_P, K_I, K_D และ K_{PF} ในสมการที่ (15) จะถูกค้นหาด้วย FPA เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_{obj} มีค่าน้อยที่สุดที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ที่ประกอบด้วย เวลาขึ้น (t_r) การพุ่งเกินสูงสุด (M_p) เวลาเข้าที่ (t_s) และความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (e_{ss}) ดังสมการที่ (18)

$$\left.\begin{aligned} Minimize \quad & f_{obj}(K_P, K_I, K_D, K_{PF}) = \sum_{i=1}^{N} |r_i - y_i| \\ subject\ to \quad & t_r \le 1.0s,\ M_p \le 10\%,\ t_s \le 2.5s,\ e_{ss} < 1\%, \\ & 0 < K_P \le 500,\ \ 0 < K_I \le 200,\ \ 0 < K_D \le 20, \\ & 0 < K_{PF} \le 500, \end{aligned}\right\} \quad (18)$$



รูปที่ 9 การออกแบบตัวควบคุม PI-PD ด้วยขั้นตอนวิธี FPA

แบบจำลองของระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อแสดงได้ด้วยแบบจำลองปริภูมสถานะ (state space model) โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ[1]

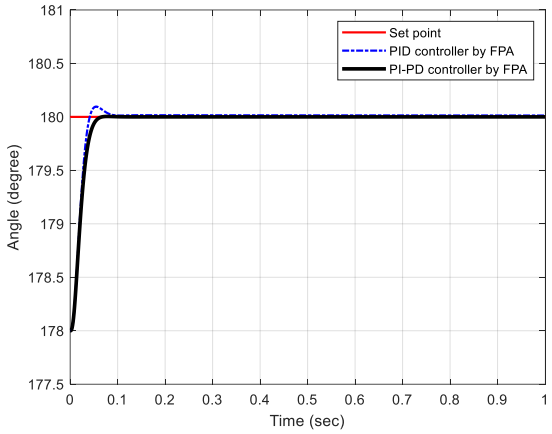
มวลของล้อหุ่นยนต์ (M_w)	0.3 kg
มวลของตัวหุ่นยนต์ (M_p)	6.0 kg
โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ (J_w)	0.0017 kg.m^2
โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวหุ่นยนต์ (J_p)	0.29 kg.m^2
รัศมีของล้อ (r)	0.077 m
ระยะจากจุดหมุนกับจุดศูนย์ถ่วงของตัวหุ่นยนต์ (l)	0.2 m
ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (K_m)	0.0458 N.m/A
ค่าคงที่ Back EMF ของมอเตอร์ (K_e)	0.0458 V.s/rad
ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ (R_a)	2.49 Ω
ค่าความโน้มถ่วง (g)	9.81 m/sec^2

ขั้นตอนวิธี FPA เพื่อการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ถูกพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ค่าพารามิเตอร์ของ FPA กำหนดตามคำแนะนำของ Xin-She Yang [9] นั่นคือ จำนวนเกสรดอกไม้ n = 25, ค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการผสมเกสรแบบวงกว้างและการผสมเกสรแบบเฉพาะที่ p = 0.8 จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด Max_Gen = 1000 เมื่อสิ้นสุดการค้นหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุม PID และ PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ แสดงตารางที่ 2

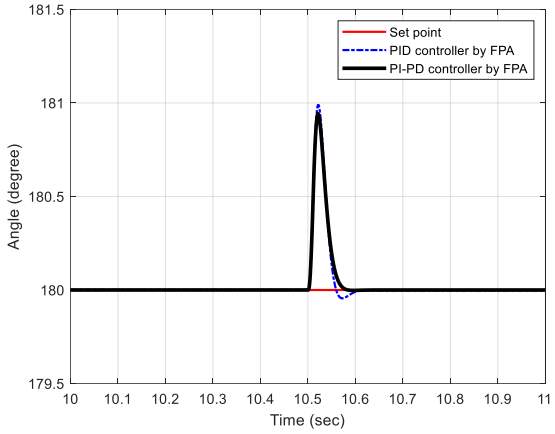
ตารางที่ 2 ตัวควบคุม PID และ PI-PD ที่เหมาะสมด้วย FPA

	K_P	K_I	K_D	K_{PF}
PID controller	499.9875	175.6659	7.6523	-
PI-PD controller	494.1438	82.1367	9.1500	0.0237

สมรรถนะของตัวควบคุม PID และ PI-PD ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี FPA สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ นั้นถูกพิจารณาจากผลตอบสนองการติดตามคำสั่งและการคุมค่าการรบกวน แสดงดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุม PI-PD ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม นั่นคือมีค่าการพุ่งเกินสูงสุด (M_p) ที่ต่ำกว่าและมีค่าเวลาการเข้าที่ของการคุมค่าการรบกวน (t_{reg}) ที่เร็วกว่า แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งในทางปฏิบัติตัวควบคุม PI-PD เหมาะสมกว่าตัวควบคุม PID กับพลานต์ที่ไม่เสถียรภาพ เช่น ระบบหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อ เป็นต้น



รูปที่ 10 ผลตอบสนองการติดตามคำสั่งแบบขั้นบันได



รูปที่ 11 ผลตอบสนองการคุมค่าการรบกวนแบบอิมพัลส์

ตารางที่ 3 สมรรถนะตัวควบคุม PID และ PI-PD ที่เหมาะสมด้วย FPA

	t_r(sec)	t_s(sec)	M_p(%)	E_{ss}(%)	t_{reg}(sec)
PID controller	0.04	0.1	5.00	0.0	0.11
PI-PD controller	0.06	0.07	0.00	0.0	0.08

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI-PD ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพสองล้อด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ ตัวควบคุมแบบ PI-PD ที่นำเสนอสามารถคุมค่าการรบกวนและลดค่าการพุ่งเกินสูงสุดเป็นที่น่าพอใจในการควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพสองซึ่งเป็นพลานต์ที่ไม่มีเสถียรภาพ ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ เป็นหนึ่งในวิธีอภิศึกษาสำนึกที่มีประสิทธิภาพในการหาผลเฉลยที่เหมาะสม ซึ่งนำมาประยุกต์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PID และ PI-PD จากผลการจำลองพบว่า ขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้สามารถหาผลเฉลยตัวควบคุม PID และ PI-PD ที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และตัวควบคุม PI-PD ให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าตัวควบคุม PID ทั้งการพุ่งเกินสูงสุดและเวลาการเข้าที่ของการคุมค่าการรบกวน

เอกสารอ้างอิง

[1] O. Jamil, M. Jamil, Y. Ayaz and K. Ahmad, “Modeling, control of a two-wheeled self-balancing robot,” 2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE), Islamabad, Pakistan, 2014, pp. 191-199.

[2] H. Khabazi and M. Shariyat, “Control and simulation of autonomous navigation of a self-balancing robot,” the 12th RSI International Conference on Robotics and Mechatronic (IcoM 2024), Tehran, Iran, 2024, pp. 226-232.

[3] O.M.M. Gad, S.Z.M. Saleh, M.A. Bulbul and S. Khadraoui, “Design and control of two wheeled self balancing robot (TWSBR),” 2022 Advanced in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirate, 2022, pp. 1-6.

[4] F.R. Jimenez, I.A. Ruge and A.F. Jimenez, “Modeling and control of a two wheeled auto-balancing robot: a didactic platform for control engineering education,” 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, Buenos Aires, Argentina, 2020, pp. 1-12.

[5] R.A.D.D. Dharmasiri and M.K. Jayananda, “A study of two-wheel self-balancing robot dynamics for control systems learning,” Current Scientia, No. 2 (2024), 2024, pp. 25-36.

[6] I. Kaya and D. Atherton, “Simple Analytical rules for PI-PD controllers to tune integrating and unstable processes,”, International Control Conference: Control 2006, Glasgow, Scotlan, 2006 pp. 1-6.

[7] M. Peram, S. Mishra, M. Vemulapaty, B. Verma and P.K. Padhy, “Optimal PI-PD and I-PD controller design using cuckoo search algorithm,” 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2018, pp. 643-646.

[8] X. S. He, X. S. Yang, M. Karamanoglu and Y. X. Zhao, “Global convergence analysis of the flower pollination algorithm: a discrete-time Markov chain approach,” Procedia Computer Science, vol. 108, 2017, pp. 1354-1364.

[9] X. S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier Inc, 2014.