บทความวิจัย (Research Article)

พฤติกรรมการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดด้วยตัวควบคุมพี พีไอ พีดี และพีไอดี

Response Behavior of a Control System for a Single-Beam Twin-Propeller Vertical Balancing Flight Model Using a P, PI, PD, and PID Controller

สมเจตน์ บุญชื่น[1] ชาญณรงค์ ท้าวอาสา[1] วรณัฏฐ์ ช้างต่อ[1] ณัฐวุฒิ คำเหลือง[1] ทวีศักดิ์ วรจักร์[1] พจน์ ชัยอ้าย[1] นัฐพงษ์ เนินชัด[1] ธนภูมิ เฟื่องเพียร[1] และ อุมาพร จันธิมา[2*]

Somjate Bunchuen[1], Channarong Thaoarsa[1], Woranat Changto[1], Nattawut Kamlueng[1], Thaweesak Worachak[1], Poth Chaiaye[1], Nattapong Nernchad[1], Thanapoom Fuangpian[1] and Umaporn Chanthima[2*]

[1]*คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*

[1]*Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University*

[2]*คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร*

[2]*Faculty of Architecture, Art and Design, Naresuan University*

*Corresponding author; email: umapornc@nu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received) 8 มิถุนายน 2569 | วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised) 13 กรกฎาคม 2569 | วันที่ตอบรับบทความ (Accepted) 14 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด และเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมสี่รูปแบบ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี การทดลองกำหนดตำแหน่งสมดุลของคานที่ 90 องศา จากนั้นทดสอบการตอบสนองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา โดยประเมินจากค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ผลการทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา พบว่าตัวควบคุมแบบพีดีให้ผลดีที่สุดด้านโอเวอร์ชูต โดยมีค่าโอเวอร์ชูต 0.50% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.01 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 0.55 องศา ขณะที่ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าโอเวอร์ชูต 1.86% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.43 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 1.90 องศา ที่มุมอ้างอิง 120 องศา ตัวควบคุมแบบพีดีให้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำที่สุด 0.41% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 4.02 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 0.45 องศา สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ตัวควบคุมแบบพีดีมีค่าโอเวอร์ชูต 3.73% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.15 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 4.10 องศา ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าโอเวอร์ชูต 6.04% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.97 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 3.20 องศา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีดีเหมาะสมที่สุดด้านการลดโอเวอร์ชูตและการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

คำสำคัญ: ระบบควบคุม, ตัวควบคุมพีไอ, ตัวควบคุมพีไอดี, คานเดี่ยวสองใบพัด, บินทรงตัวในแนวดิ่ง

Abstract

This research aims to develop a single-beam twin-propeller vertical balancing flight model and compare the response behaviors of the system controlled by four controller types: P, PI, PD, and PID controllers. In the experiments, the beam equilibrium position was set to 90°. The response tests were then conducted at reference angles of 110°, 120°, and 130°. The system performance was evaluated in terms of overshoot, settling time, and steady-state error. At the reference angle of 110 °, the PD controller provided the best overshoot performance, with an overshoot of 0.50%, a settling time of 2.01 s, and a steady-state error of 0.55 °. Meanwhile, the PID controller produced an overshoot of 1.86%, a settling time of 2.43 s, and a steady-state error of 1.90 °. At the reference angle of 120 °, the PD controller achieved the lowest overshoot of 0.41%, with a settling time of 4.02 s and a steady-state error of 0.45 °. At the reference angle of 130 °, the PD controller produced an overshoot of 3.73%, a settling time of 1.15 s, and a steady-state error of 4.10 °. The PID controller produced an overshoot of 6.04%, a settling time of 2.97 s, and a steady-state error of 3.20 °. The experimental results show that the PD controller is the most suitable for reducing overshoot and achieving a fast response, while the PID controller can compensate for steady-state error.

Keywords: control system, PD controller, PID controller, single-beam twin-propeller, vertical balancing fli

บทนำ

ในปัจจุบันระบบควบคุมอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม เมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์ อากาศยานไร้คนขับ และระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรทางกายภาพ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว มุม องศา แรง อุณหภูมิ และระดับความสูงให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดอย่างมีเสถียรภาพ หลักการที่นิยมใช้ควบคุมตัวแปรดังกล่าวคือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรือระบบสมองกลฝังตัวได้ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional–Integral–Derivative Controller, PID)เป็นตัวควบคุมระบบที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมความสูงของเครื่องบินสี่ใบพัดขนาดเล็กพบว่าการใช้ตัวควบคุมร่วมกับตัวสังเกตคาลมานช่วยปรับปรุงความสามารถในการควบคุมระดับเพดานบินได้ดีขึ้น [1] ขณะที่งานวิจัยด้านการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพีไอดีสามารถทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ตอบสนองต่อค่ากำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีร่วมกับบอร์ดอีเอสพีสามสองในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสร่วมกับตัวกรองคาลมาน [3]

ตัวควบคุมแบบพีดีและพีไอดีมีบทบาทสำคัญในงานควบคุมระบบที่เกี่ยวข้องกับการทรงตัว เนื่องจากระบบทรงตัวมีความไม่เสถียรและตอบสนองไวต่อสิ่งรบกวน งานวิจัยที่เสนอการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพื้นฐานโดยใช้ MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมสามารถทำให้ระบบที่ไม่เสถียรสามารถรักษาสมดุลได้ [4] สอดคล้องกับงานวิจัยการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพีดีและแอลคิวอาร์ ซึ่งพบว่าพจน์อนุพันธ์มีส่วนช่วยลดการแกว่งและเพิ่มเสถียรภาพของระบบ [5] แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยนี้โดยการนำเซนเซอร์วัดมุมเป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมการบินเป็นแรงยกจากใบพัดทั้งสองด้าน หากแรงยกสองด้านไม่สมดุล คานจะเกิดการเอียงขึ้นหรือลงทันที

สำหรับระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และใบพัด งานวิจัยเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนสี่ใบพัดได้นำเสนอระบบควบคุมทิศทางแรงขับเสริมเพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงขับของใบพัดมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของอากาศยานโดยตรง [6] งานวิจัยที่สร้างแบบจำลองและจำลองคุณลักษณะทางพลวัตของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อศึกษาความมีเสถียรภาพ การควบคุม และการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุม ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติได้ [7] นอกจากนี้ การออกแบบระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับยังต้องพิจารณาสมรรถนะของระบบควบคุมทั้งในด้านเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว และความพยายามในการควบคุม โดยมีงานวิจัยที่ออกแบบระบบควบคุมวงในของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงด้วยตัวควบคุมพีไอดี และใช้กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [8] สำหรับระบบอากาศยานที่ใช้ใบพัดเป็นแหล่งสร้างแรงยก งานวิจัยด้านการออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดได้แสดงให้เห็นว่าการจัดวางใบพัด ทิศทางแรงขับ และโครงสร้างตัวควบคุมมีผลต่อความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของอากาศยาน โดยเฉพาะงานออกแบบอากาศยานไร้คนขับแบบ 5 ใบพัดหมุนที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบไม่เชิงเส้น และการจัดสรรแรงขับของโรเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ต้องการ [9] สำหรับการนำเสนอการควบคุมระบบ Twin Rotor MIMO System (TRMS) ซึ่งเป็นระบบที่มีลักษณะใกล้เคียงกับแบบจำลองอากาศยานขนาดเล็ก มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นสูงและมีการเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรควบคุมหลายตัว จึงได้ออกแบบและเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PID และ LQR (Linear Quadratic Regulator) ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบในระนาบแนวดิ่งและแนวระดับ [10] นอกจากนี้การศึกษาแบบจำลองเชิงเส้นและการควบคุมระบบ Twin Rotor Aero-dynamical System (TRAS) จึงได้ออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้นสามรูปแบบได้แก่ 1) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะเต็ม (Full State Feedback, FSF) 2) LQR และ 3) PID เพื่อควบคุมตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมของระบบในระนาบแนวดิ่งและแนวระดับ ผลการจำลองและ

การทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแต่ละแบบมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน โดย LQR ให้สมรรถนะที่ดีกว่า แต่ต้องใช้ความพยายามในการควบคุม (control effort) มากกว่า ขณะที่ PID เป็นวิธีที่เรียบง่ายและสามารถใช้งานได้ดีกับแบบจำลองเชิงเส้น [11]

แม้ว่าตัวควบคุมแบบ PID จะถูกนำไปใช้ในงานควบคุมอย่างแพร่หลาย แต่งานวิจัยจำนวนมากยังเน้นการจำลองหรือการประยุกต์กับระบบเฉพาะด้าน ขณะที่การเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวควบคุมพี (P) พีไอ (PI) พีดี (PD) และพีไอดี PID กับชุดทดลองจริงของระบบคานเดี่ยวสองใบพัดยังมีค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการวิเคราะห์ผลตอบสนองของมุมเอียงภายใต้มุมอ้างอิงหลายระดับ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมมุมเอียงของคานด้วยตัวควบคุมรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี โดยใช้เอ็นโค้ดเดอร์วัดมุมเป็นสัญญาณป้อนกลับ และใช้บอร์ด Arduino Uno ประมวลผลสัญญาณควบคุมไปยังชุดใบพัดทั้งสองด้าน เพื่อเปรียบเทียบค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ ซึ่งผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมการทรงตัวของอากาศยานจำลอง หุ่นยนต์ทรงตัว และระบบควบคุมเชิงกลที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพต่อไป

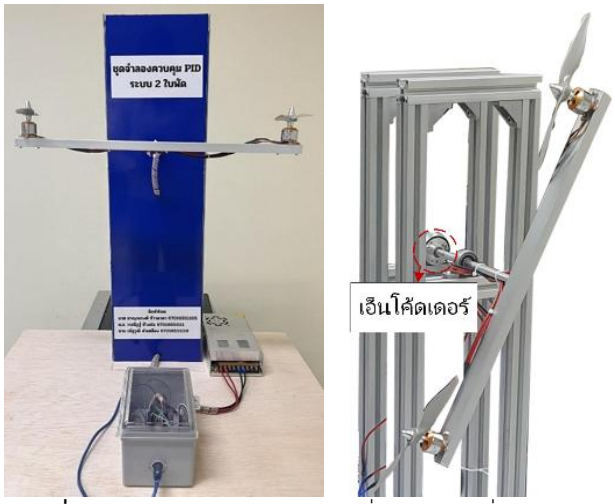
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด และเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมสี่รูปแบบ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี ที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา โดยประเมินจากค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

วิธีดำเนินการวิจัย

1 แบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดแสดงดังภาพที่ 1 เพื่อศึกษาการควบคุมมุมเอียงของระบบให้สามารถรักษาสมดุลตามค่ามุมอ้างอิงที่กำหนดได้ ระบบจำลองประกอบด้วยคานเดี่ยวน้ำหนักเบายาว 40 เซนติเมตร ที่มีจุดหมุนอยู่กึ่งกลางของคาน โดยปลายคานทั้งสองด้านติดตั้งชุดใบพัด ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านรุ่น A2212/15T 930KV ความเร็ว 1000 รอบต่อนาทีต่อแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ ชุดใบพัดทั้งสองทำหน้าที่สร้างแรงยกในแนวดิ่ง เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองด้านแตกต่างกัน จะทำให้เกิดแรงบิดรอบจุดหมุน ส่งผลให้คานเกิดการเอียงขึ้นหรือลงตามทิศทางของแรงยกที่เกิดขึ้น

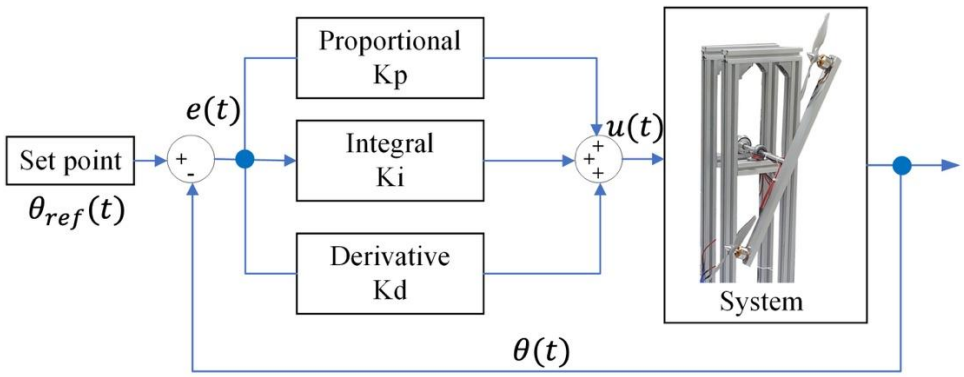


ภาพที่ 1 ระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ระบบดังภาพที่ 1 มีลักษณะคล้ายการเคลื่อนที่ในแนวพิทช์ของอากาศยาน โดยตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือมุมเอียงของคานเทียบกับแนวระดับ การวัดมุมเอียงของคานใช้เอ็นโค้ดเดอร์รุ่น AHT3806 600P/R ตรวจวัดมุม ซึ่งติดตั้งในแนวแกนเดียวกันกับจุดหมุนของคาน เพื่อส่งค่ามุมปัจจุบันกลับมายังบอร์ดควบคุมซึ่งงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดอาดูโนยูโน (Arduino Uno) จากนั้นบอร์ดควบคุมจะนำค่ามุมที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามุมอ้างอิง แล้วคำนวณสัญญาณควบคุมเพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองด้านผ่านวงจรขับมอเตอร์ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดรุ่นอีเอสซี 30 แอมแปร์ (ESC 30A)

2 ตัวควบคุมพีไอดี

งานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบป้อนกลับแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานควบคุมอัตโนมัติ [12] เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถปรับแต่งค่าได้ง่าย [13] และให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมพีไอดีใช้ควบคุมมุมเอียงของแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมอ้างอิงกับมุมที่วัดได้จริงเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม



ภาพที่ 2 ระบบควบคุมพีไอดีแบบป้อนกลับสำหรับระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบสามารถกำหนดได้จากสมการที่ 1

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t) \tag{1}$$

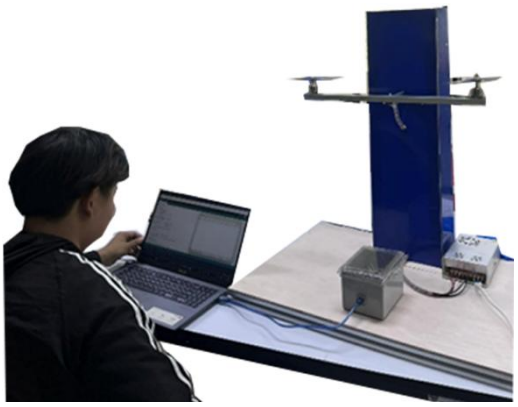
เมื่อ $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เวลา t $\theta_{ref}(t)$ คือค่ามุมอ้างอิง และ $\theta(t)$ คือค่ามุมเอียงจริงที่วัดได้จากระบบ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2 นั่นคือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e\,(t)di + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

เมื่อ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังชุดขับมอเตอร์ K_p คืออัตราขยายเชิงสัดส่วน K_i คืออัตราขยายเชิงปริพันธ์ และ K_d คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์

3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ ได้แก่ คานเดี่ยว ชุดมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ใบพัด วงจรขับมอเตอร์ เอ็นโค้ดเดอร์เซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟ และบอร์ดควบคุมพร้อมเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ติดตั้งการทดลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ขั้นตอนที่ 2 ก่อนเริ่มการทดลองได้ปรับเทียบเอ็นโค้ดเดอร์โดยวางคานให้อยู่ในแนวระดับและกำหนดค่ามุมเริ่มต้นเป็น 90 องศา จากนั้นทดสอบหมุนมอเตอร์ทั้งสองด้านในระดับสัญญาณ PWM ที่ใกล้เคียงกัน และปรับค่าชดเชย (offset) ของสัญญาณควบคุมแต่ละด้านจนคานสามารถรักษาตำแหน่งใกล้ 90 องศาได้มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 การทดลองเริ่มจากป้อนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (K_p , K_i และ K_d) เข้าสู่โปรแกรมควบคุม ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการปรับจูนแบบทดลองทีละขั้น โดยเริ่มจากการกำหนดค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ แล้วปรับค่า K_p จนระบบสามารถตอบสนองต่อมุมอ้างอิง จากนั้นเพิ่มค่า K_i เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว และเพิ่มค่า K_d เพื่อลดการแกว่งและค่าโอเวอร์ชูตของระบบ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณีถูกเลือกจากชุดค่าที่ให้การตอบสนองของระบบมีความสมดุลที่สุดภายใต้เงื่อนไขของมุมอ้างอิงที่กำหนด จากนั้นป้อนมุมอ้างอิง $\theta_{ref}(t)$ เพื่อให้มอเตอร์ทั้งสองด้านหมุนสร้างแรงยกที่ต่างกัน เอ็นโค้ดเดอร์ตรวจวัดมุมเอียง $\theta(t)$ ของคานและส่งข้อมูลมุมองศากลับไปยังระบบควบคุมเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ และสร้างสัญญาณควบคุม $u(t)$ แบบคาบเวลา (Discrete-time)

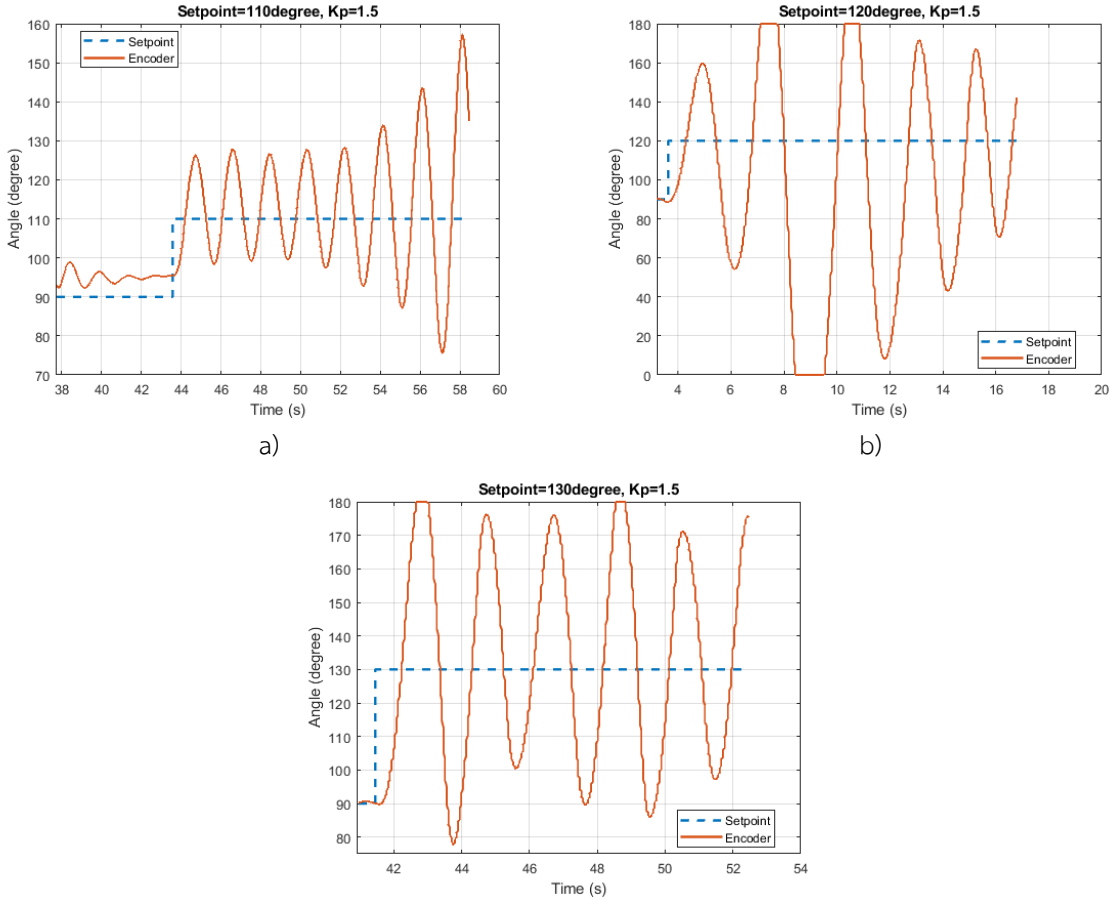
ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการบันทึกค่ามุมเอียงของคาน ค่ามุมอ้างอิง และพฤติกรรมการตอบสนองของระบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ การเกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot) ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) และลักษณะการแกว่งของคาน นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่ามุมอ้างอิงสามค่า ได้แก่ 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของตัวควบคุม ในการเลือกมุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบเมื่อคานเบี่ยงเบนจากตำแหน่งสมดุล 90 องศาในระดับที่แตกต่างกัน โดยมุม 110 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับต่ำ มุม 120 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับปานกลาง และมุม 130 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับสูง

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผล โดยค่า Overshoot คำนวณจากค่าสูงสุดของกราฟหลังมีการเปลี่ยนมุมอ้างอิง ค่า Settling Time พิจารณาจากเวลาที่สัญญาณมุมเอียงเข้าสู่บริเวณใกล้ค่ามุมอ้างอิง และค่า Steady-State Error คำนวณจากผลต่างระหว่างมุมอ้างอิงกับค่ามุมในช่วงท้ายของการทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1 การทดลองควบคุมแบบพี

จากภาพที่ 4 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีเมื่อตั้งค่าอัตราขยายพารามิเตอร์ K_p เท่ากับ 1.5 ในสภาวะเริ่มต้นระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุลทำให้อ่านค่ามุมจากเอ็นโค้ดเดอร์เท่ากับ 90 องศา จากนั้นตั้งค่ามุมอ้างอิงไปที่ 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา ดังภาพที่ 4 a) b) c) ตามลำดับ พบว่าระบบมีการตอบสนอง แต่เกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot) มีค่า 41.82% 54.54% และ 45.45% เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) มีค่าค่อนข้างสูงและไม่สม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพี เพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวได้

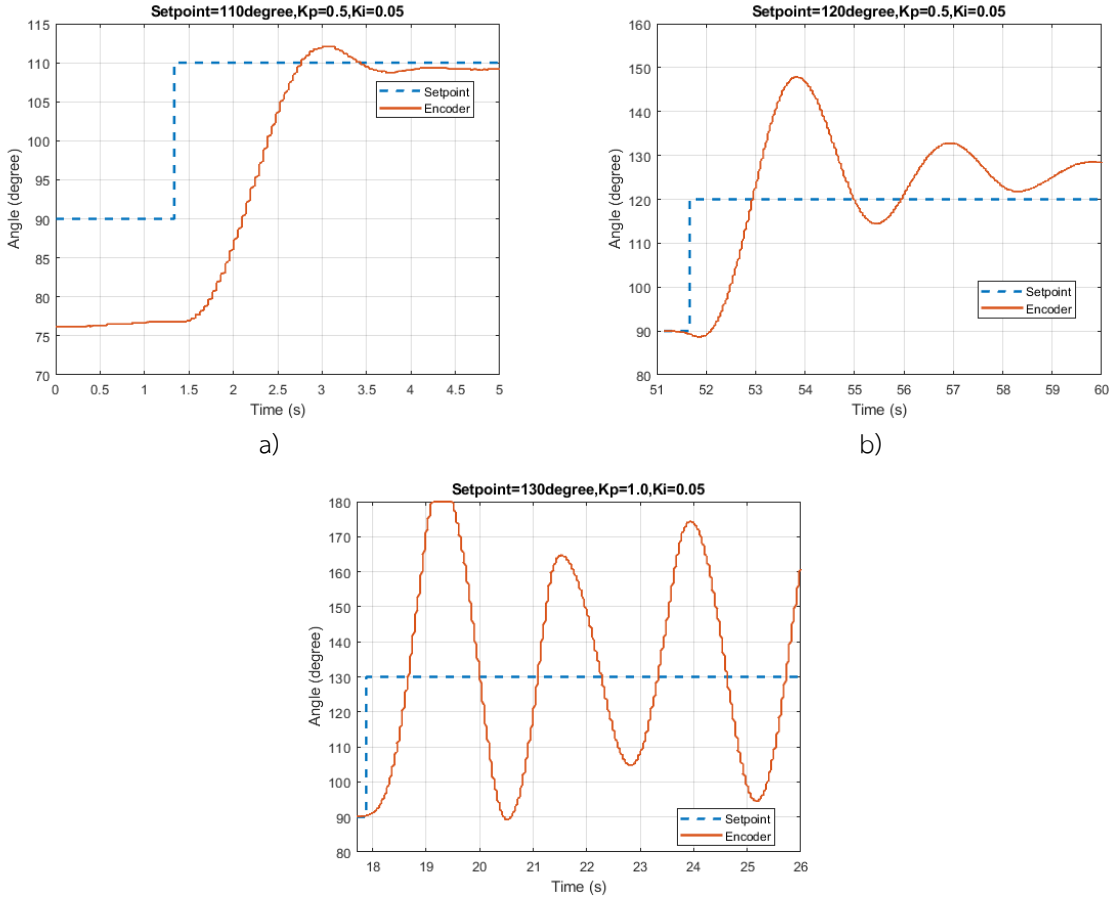


ภาพที่ 4 การทดลองควบคุมระบบเมื่อตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีเท่ากับ 1.5 a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

2 การทดลองควบคุมแบบพีไอ

จากภาพที่ 5 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 5 a) ระบบสามารถตอบสนองต่อค่ามุมอ้างอิงได้ โดยมุมเอียงที่วัดได้จากเอ็นโค้ดเดอร์เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งเริ่มต้นเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงและเกิดโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อย ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่บริเวณค่ามุมอ้างอิง เมื่อเพิ่มมุมอ้างอิงเป็น 120 องศา ดังภาพที่ 5 b) พบว่าระบบยัง

สามารถติดตามค่ามุมอ้างอิงได้ แต่มีค่าโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่ามุมที่อ่านได้สูงกว่าค่ามุมอ้างอิงก่อนจะลดลงและเกิดการแกว่งรอบค่ามุมอ้างอิงในช่วงเวลาหนึ่ง ลักษณะดังกล่าวเกิดจากผลของพจน์ปริพันธ์ทำให้ระบบเกิดการสะสมของค่าความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้การตอบสนองมีการแกว่งและใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สภาวะคงตัว สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 5 c) ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นจากแรงยกของใบพัด โมเมนต์ของคาน และแรงโน้มถ่วง ทำให้ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ชุดเดิมไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดี อีกทั้งพจน์ปริพันธ์มีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมค่าอินทิกรัล (integral windup) ซึ่งทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูตสูงและแกว่งต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอยังไม่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบที่มุมอ้างอิงสูงของระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

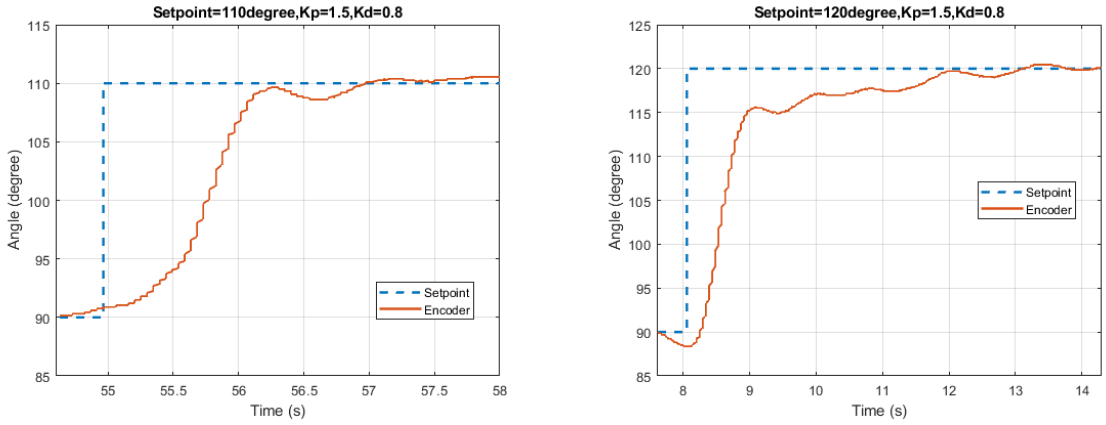


ภาพที่ 5 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

3 การทดลองควบคุมแบบพีดี

ผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดีแสดงดังภาพที่ 6 โดยทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 6 a) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้และมีโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นการทำงานของพจน์อนุพันธ์ของตัวควบคุม

สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา ดังภาพที่ 6 b) ระบบยังคงตอบสนองได้ดี มีการแกว่งเพียงเล็กน้อย และสามารถรักษาค่ามุมให้อยู่ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 6 c) ตัวควบคุมแบบพีดียังเกิดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (offset) เล็กน้อย เนื่องจากไม่มีพจน์ปริพันธ์สำหรับชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนสะสม อย่างไรก็ตาม ระบบยังให้ค่า overshoot เพียง 3.73% และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.15 วินาที ซึ่งดีกว่าตัวควบคุมแบบพีและพีไออย่างชัดเจน

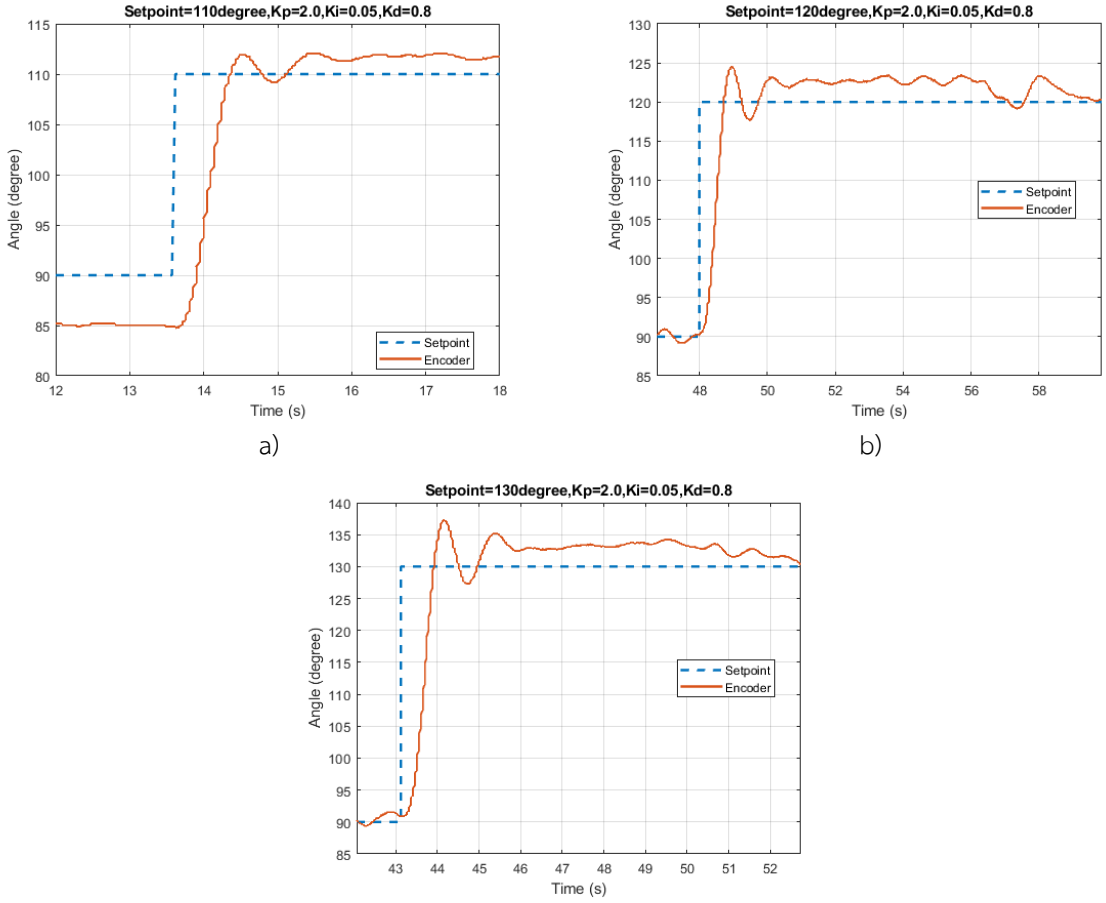


ภาพที่ 6 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดี a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

4 การทดลองควบคุมแบบพีไอดี

จากภาพที่ 7 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 7 a) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้รวดเร็ว มีค่าโอเวอร์ชูตเล็กน้อย และสามารถรักษามุมให้ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา ดังภาพที่ 7 b) ระบบตอบสนองได้รวดเร็ว โดยมีโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อยในช่วงต้น จากนั้นค่ามุมเข้าสู่บริเวณใกล้ค่ามุมอ้างอิงและแกว่งอยู่ในช่วงแคบ แสดงให้เห็นว่าการรวมกันของพจน์สัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ สามารถช่วยให้ระบบมีทั้งความเร็วในการตอบสนอง การลดค่าความคลาดเคลื่อน และการลดการแกว่งของระบบได้ดีขึ้น สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 7 c) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้

รวดเร็วเช่นเดียวกับกรณีอื่น แม้จะเกิดโอเวอร์ชูตในช่วงเริ่มต้น แต่หลังจากนั้นระบบสามารถลดการแกว่งลงและรักษาค่ามุมให้อยู่ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีและพีไอ



ภาพที่ 7 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

เมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีดีและพีไอดี พบว่าพีดีให้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำกว่าพีไอดีในทุกมุมอ้างอิง เนื่องจากพจน์อนุพันธ์ช่วยหน่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน ทำให้ระบบไม่พุ่งเกินค่ามุมอ้างอิงมากเกินไป ขณะที่พีไอดีมีพจน์ปริพันธ์เพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว แต่พจน์ดังกล่าวอาจทำให้เกิดการสะสมของสัญญาณควบคุมและทำให้เกิดโอเวอร์ชูตสูงขึ้นได้ ดังนั้นในระบบทดลองนี้พีดีเหมาะสมเมื่อเน้นการตอบสนองเร็วและโอเวอร์ชูตต่ำ ส่วนพีไอดีเหมาะสมเมื่อเน้นการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

5 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการตอบสนองของระบบดังตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3 พบว่าตัวควบคุมแบบพีดีให้ผลเด่นที่สุดในด้านการลดค่าโอเวอร์ชูตและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีและพีไอ ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถช่วยชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวและทำให้ระบบมีความเสถียร แต่มีค่าโอเวอร์ชูตสูงกว่าแบบพีดีในทุกมุมอ้างอิง ดังนั้นการเลือกตัวควบคุมควรพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการควบคุมนั่นคือ หากต้องการลดโอเวอร์ชูตและตอบสนองเร็ว ตัวควบคุมแบบพีดีมีความเหมาะสมกว่า แต่หากต้องการเน้นการลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ตัวควบคุมแบบพีไอดียังเป็นตัวเลือกที่ควรพิจารณา

ตารางที่ 1 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	**ความเสถียรของระบบ**
P	1.5	0	0	41.82%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบตอบสนองได้ แต่เกิดการแกว่งสูงและไม่เสถียร
PI	0.5	0.05	0	1.82%	2.66	0.65	ลดความคลาดเคลื่อนได้ดี แต่ตอบสนองช้ากว่า PD
PD	1.5	0	0.8	0.50%	2.01	0.55	ระบบตอบสนองเร็ว โอเวอร์ชูตต่ำ
PID	2.0	0.05	0.8	1.86%	2.43	1.90	ระบบตอบสนองเร็ว แต่ยังมีค่ามุมสูงกว่าค่ากำหนดเล็กน้อย

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

ตารางที่ 2 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	**ความเสถียรของระบบ**
P	1.5	0	0	54.54%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	โอเวอร์ชูตสูง ระบบแกว่งมาก
PI	0.5	0.05	0	25.45%	7.85	8.1	ลดการแกว่งได้บางส่วนเมื่อเทียบกับตัวควบคุม P แต่ยังมีโอเวอร์ชูตและความคลาดเคลื่อนสูง
PD	1.5	0	0.8	0.41%	4.02	0.45	ระบบตอบสนองค่อนข้างเร็ว แกว่งน้อย และรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PID	2.0	0.05	0.8	4.10%	2.15	2.0	ระบบควบคุมได้ดี แต่ยังมีการแกว่งเล็กน้อย และยังมีค่ามุมสูงกว่าค่ากำหนดเล็กน้อย

ตารางที่ 3 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 130 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	ความเสถียรของระบบ
P	1.5	0	0	45.45%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบแกว่งมากและไม่สามารถรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PI	1.0	0.05	0	45.45%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบแกว่งมากและไม่สามารถรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PD	1.5	0	0.8	3.73%	1.15	4.1	ระบบตอบสนองเร็วและแกว่งเล็กน้อย แต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว
PID	2.0	0.05	0.8	6.04%	2.97	3.2	ระบบมีความเสถียรแต่ยังมีโอเวอร์ชูตและความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

สรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างและทดลองการควบคุมของแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดี และพีไอดี เริ่มจากการสร้างระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด ประกอบด้วยคานที่ติดตั้งใบพัดไว้ทั้งสองฝั่ง มีจุดหมุนอยู่ตรงกลางและติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อวัดมุมเอียงของคาน แรงยกจากใบพัดทั้งสองฝั่งสามารถทำให้ระบบรักษาสมดุลตามมุมอ้างอิงที่กำหนดได้ การทดลองควบคุมมุมเอียงของระบบประกอบไปด้วยมุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถตอบสนองต่อค่ามุมอ้างอิงได้ในทุกรูปแบบการควบคุม แต่ลักษณะการตอบสนองแตกต่างกันตามค่าพารามิเตอร์และชนิดของตัวควบคุม อย่างไรก็ตามระบบยังมีค่าโอเวอร์ชูตและค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในบางกรณี โดยมีข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัยในครั้งต่อไปคือควรปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมกับแต่ละมุมอ้างอิง หรือพัฒนาระบบควบคุม เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ความเสถียร และความสามารถในการควบคุมระบบภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ทินกร เขียวรี. การควบคุมความสูงระดับเพดานบินโดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ร่วมกับตัวสังเกตคาลมาน สำหรับเครื่องบิน 4 ใบพัดขนาดเล็ก. วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ. 2561; 6(2): 148-156. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/149110
2. กำจัด ใจตรง, สงกรานต์ ภารกุล, ณรงค์ฤทธิ์ ยิ้มเจริญพรสกุล. การควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ. 2564; 5(1): 78-86. https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JSciTech/article/view/344
3. ภูมิพัฒน์ กำคำ, ชัชวาล มงคล, จักรพันธ์ ปิ่นทอง, เสกสรรค์ สุชัยพร. การพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีบนอีเอสพี 32 สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวกรองคาลมาน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. 2568; 7(3): 392-406. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/article/view/262567
4. ครรชิต ภาวนานนท์, ดวงกมล อังอำนวยศิริ, กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, กฤชนันท์ เจริญสุข. การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมแบบพื้นฐาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2565; 10(2): 9-22. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/248385
5. กฤชนันท์ เจริญสุข, กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, ดวงกมล อังอำนวยศิริ, ครรชิต ภาวนานนท์. การออกแบบและควบคุมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพีดี และแอลคิวอาร์ โดยใช้โปรแกรม Simulink. Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT). 2565; 10(2): 81-96. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/article/view/248456
6. ชนะพันธ์ ศรีจันทร์, ณัฐวุฒิ เดไปวา. ระบบควบคุมทิศทางแรงขับเสริมเพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนสี่ใบพัด. Engineering and Technology Horizons. 2567; 41(1): 410112. https://doi.org/10.55003/ETH.410112
7. เจนวิทย์ คำพูล. การสร้างแบบจำลองและการจำลองคุณลักษณะทางพลวัตในการบินของ อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก Sky Surfer. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ. 2561; 14(1): 86-97. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/159334
8. ณัฐพงษ์ รื่นฤดีพันธ์, ยศเดช กนกเมธากุล, ณัญธิวัฒน์ พลดี, สุจินต์ บุรีรัตน์. การออกแบบระบบควบคุมวงในของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงโดยใช้เมตาฮิวริสติกส์. วารสารวิจัย มข. ฉบับบัณฑิตศึกษา. 2565; 22(3): 161-173. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/244744
9. ศุภโชค ตันติวิวัทน์. การออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับแบบ 5 ใบพัดหมุน โดยมีใบพัดคู่ควบตรงกลางที่สามารถปรับความเอียงได้ 2 ทิศทาง (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต). วิศวกรรมเครื่องกล, วิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2566. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/10278
10. Chaudhary S, Kumar A. Control of Twin Rotor MIMO System using PID and LQR Controller. Journal of Aircraft and Spacecraft Technology. 2019; 3(1): 211-220. https://doi.org/10.3844/jastsp.2019.211.220

11. Almtireen N, Elmoaqet H, Ryalat M. Linearized Modelling and Control for a Twin Rotor System. Automatic Control and Computer Sciences. 2018; 52(6) :539-551. https://doi.org/10.3103/S0146411618060020
12. วิสิทธิ์ ลุมชะเนาว์, ธนกร ดุจเพ็ญ. การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับจิ้งหรีด ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบพีไอดี. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2568; 13(1): 27-39. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/259485
13. ราเชณ คณะนา, อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์. การออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอดีเอแบบอเนกประสงค์ และการประยุกต์ใช้งาน. วารสารสายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. 2562; 5(1): 41-48. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/saujournalst/article/view/200828
14. สัตถาภูมิ ไทยพานิช, ไพศาล แห้วเพ็ชร, ดนุพล คำปัญญา. การออกแบบตัวควบคุมไอ-พีดีอย่างเหมาะสมเพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมด้วยขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. วารสารสหวิชาการงานวิจัยและนวัตกรรมสังคม. 2568; 1(3): 1-18. https://so10.tci-thaijo.org/index.php/MRSI/article/view/2780