การควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุลด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ

Balancing Beam with Propeller Controlled by Fuzzy PD+I Implement with I Controller

ชาติ ฤทธิ์หิรัญ อนุชิต เจริญ และวิญญู แสวงสินกสิกิจ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต winyu.saw@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมสมดุลของคานทรงตัว ที่ขับเคลื่อนใบพัด 1 ตัวที่ปลายคานข้างหนึ่ง ระบบนี้ถูกออกแบบควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอาดูโน่ มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดมุม GY521 ที่จะอ่านค่าไจโรสโคปและตัววัดความเร่ง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งสมดุลของมุมที่ต้องการในการควบคุมสมดุลของคานทรงตัว สำหรับการควบคุมใช้ระบบตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอที่มีการเพิ่มพูนตัวควบคุมไอเข้าไปในระบบเพื่อนำไปควบคุมความเร็วรอบใบพัดรักษาสมดุลในมุมที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้อง ในการทดสอบการควบคุมความสมดุลของมุมที่ต้องการในตำแหน่งต่างๆ ได้มีการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิม และตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถควบคุมมุมต่างๆที่ต้องการได้เป็นอย่างดี และสามารถเข้าสู่จุดเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว และเป็นการแก้ข้อด้อยของตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิมได้ในกรณีที่ระบบที่ต้องการควบคุมไม่เป็นแบบไดนามิค หรือเป็นระบบที่ยังมีค่าผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลง ระบบไม่สามารถควบคุมให้เข้าสู่จุดเป้าหมายได้ การควบคุมด้วยตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมระบบดังกล่าวให้เข้าสู่เป้าหมายได้เป็นอย่างดี รวดเร็วและมีค่าผิดพลาดน้อยอีกด้วย

คำสำคัญ: คานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุล, ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกคอนโทรล

Abstract

This paper presents The Balancing Beam with Propeller Controlled by Fuzzy PD+I Implement with I Controller which powered by one propeller at the end of the beam. This system is designed to be controlled by the Aduino family microcontroller. We have the gyroscope and accelerometer as the angle sensor is installed to measure and calculate the angle from them. This angle is compared to the desired balance target angle which is set before testing the control system. The Fuzzy PD+I implement with I controller is enhanced in to the system and used to control the speed of the propeller to adjust the speed to control the balance of the desired angle in various positions. The results are compared with the original Fuzzy PD+I and classical PID controller and the test results show that the control with the Fuzzy PD+I which implement with I controller can control the various angles that need is very well. Moreover the control system can enter to the target balance angle so quickly , which is a solution to the disadvantages of the original Fuzzy PD+I has the problem to control the non dynamic system if the system that still has errors and cannot control to enter the target point. This implement I controller to the original Fuzzy PD+I is showed that the controller can control the system to be able to enter the target and so quickly as well and also the less of error.

1. บทนำ

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่เป็นโครงสร้างที่ง่ายและเป็นที่นิยมอย่างมากในอดีตและปัจจุบัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และโหลดรบกวนจึงมีความยากลำบากที่เกิดขึ้นในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของพีไอดี เพื่อลดการเกิดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ จึงมีการพัฒนาเกี่ยวกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือที่เรารู้จักกันในชื่อของฟัซซีลอจิกคอนโทรล และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในเกือบทุกด้าน รวมถึงการควบคุมอัตโนมัติ สำหรับระบบและกระบวนการที่มีโมเดลทางคณิตศาสตร์ไม่ชัดเจน และระบบที่มีความไม่แน่นอน หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อน มีการเปลี่ยนแปลงจุดเป้าหมายที่ไม่ใช่ค่าจุดเป้าหมายค่าเดียวตลอด และการทดสอบในการควบคุมความเร็วของใบพัดปรับสมดุลคานทรงตัวกับมุมที่ต้องการหลายค่า โดยที่ตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิมนี้ จะถูกเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอเข้าไปในระบบด้วย เพื่อแก้ปัญหาระบบที่ไม่เป็นไดนามิค ซึ่งผลการทดสอบระบบควบคุมที่มีค่าพารามิเตอร์การจูนที่เหมาะสม และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับระบบควบคุมแบบอื่น แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้สามารถควบคุมการเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ต้องการได้เป็นอย่างดี

CT 11

2. การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ [1-3] และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ

ในการออกแบบตัวควบคุมนี้เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดบัสเลสเพื่อหมุนใบพัด ด้วยการควบคุมความเร็วผ่านชุด ESC (Electronic Speed Control) ที่มีสัญญาณการควบคุมแบบ Pulse Width Modulation ที่มีช่วงกว้างของคลื่น 1500-2000 มิลลิวินาที ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิมนั้น จะประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดี และตัวควบคุมฟัซซีไอ ซึ่งมีค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอในเทอมของ S Domain คือ

$$U_{PD+I}(s) = (K_p^c + sK_d^c E(s) + \frac{K_I^c}{s} E(s) \quad (1)$$

เมื่อ K_p^c , K_d^c และ K_i^c เป็นค่าเกนของ Proportional, Derivative และ Integral ตามลำดับ และ $E(s)$ เป็นค่าสัญญาณผิดพลาด

จากสมการ (1) สามารถเปลี่ยนเป็นแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้การแปลงไบลีเนียทรานฟอร์ม (Bilinear Transformation)

$$s = (2/T)[(Z-1)/(Z+1)]$$

เมื่อ T คือเวลาสุ่ม จะได้รูปของโดเมนความถี่ดังนี้

$$U_{PD+I}(z) = (K_p^c + K_d^c \frac{T}{2}\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) E(z) + K_i^c \frac{T}{2}\left(1 + \frac{2z^{-1}}{1-z^{-1}}\right) E(z) \quad (2)$$

กำหนดให้ $K_p = K_p^c$, K_d=2 K_d/T และ $K_i = K_i^c$

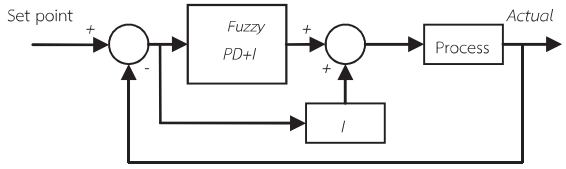
และทำการอินเวิร์ทซีทรานฟอร์มจะได้

$$U_{PD+I}(n) = -U_{PD}(n-1) + Ku_{PD}\Delta U_{PD}(n) + U_I(n-1)$$
$$+Ku_i \Delta U_I(n) \quad (3)$$

เมื่อ Ku_{PD} คือฟัซซีคอนโทรลเกนของฟัซซีพีดี

Ku_I คือฟัซซีคอนโทรลเกนของฟัซซีไอ

และทำการเพิ่มพูนตัวควบคุมไอ จะได้ระบบควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอใหม่ดังแสดงในรูปที่ 1

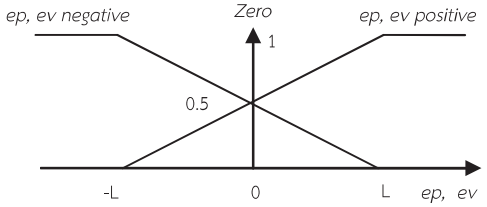


รูปที่ 1 ระบบควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ

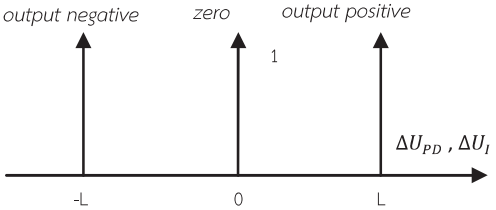
ดังนั้นระบบตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอสามารถหาได้ดังนี้

$$U_{PD+I}(n) = -U_{PD}(n-1) + Ku_{PD}\Delta U_{PD}(n) + U_I(n-1)$$
$$+Ku_i \Delta U_I(n) + K_i e(n) \quad (4)$$

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอนั้น ฟังก์ชันสมาชิกด้านอินพุตจะมี 2 ค่าคือ ค่าความผิดพลาดของมุมที่ควบคุม e_p และค่าอัตราเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดของมุมที่ควบคุม e_v ส่วนฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุตจะเป็นค่า ΔU_{PD} และ ΔU_I และฟังก์ชันสมาชิกด้าน อินพุตและฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านอินพุตของฟัซซีพีดี และฟัซซีไอ



รูปที่ 3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุตของฟัซซีพีดี และฟัซซีไอ

การกำหนดกฎพื้นฐานจากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสมาชิกอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตเพื่อตอบสนองต่อการควบคุมให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยออกแบบด้วยกฎการควบคุม 8 ข้อดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กฎของการควบคุมฟัซซีลอจิกคอนโทรล ของฟังก์ชันสมาชิกทางด้านอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกด้านเอาต์พุต

Rule No.	$e_p(n)$	$e_v(n)$	*Output*
R1	P	P	0
R2	P	N	L
R3	N	P	-L
R4	N	N	0
Rule No.	$e_p(n-1)$	$e_v(n)$	*Output*
R5	P	P	L
R6	P	N	0
R7	N	P	0
R8	N	N	-L

เมื่อ $e_p(n)$ คือค่าผิดพลาด

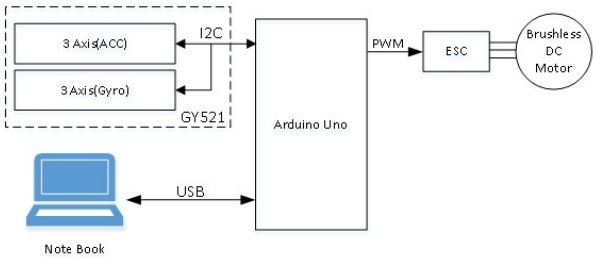
$e_v(n)$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด

$e_p(n-1)$ คือค่าผิดพลาดที่หน่วงเวลา

การดิฟัซซีพิเคชั่นใช้หลักจุดกึ่งกลางมวล (Center of mass) มาคำนวณดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\Delta u(nT) = \frac{\sum\{\text{membership value of input x corresponding output}\}}{\sum\{\text{membership value of input}\}} \quad (5)$$

บล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุลด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุล

ในการออกแบบฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมนี้ จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต Arduino Uno จำนวน 1 ชุดในการเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดมุม GY521 และรับ-ส่งข้อมูลเพื่อเก็บบันทึกผลการทดสอบแสดงชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 ชุดทดสอบระบบควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุล

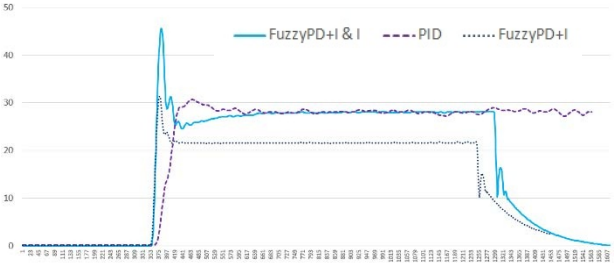
3. การทดสอบการทำงานของระบบควบคุม

การทดสอบระบบการควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุลคานจะเริ่มต้นอยู่ในตำแหน่งจากแนวดิ่งที่มีมุมเอียงอยู่ 32 องศา(รูปที่ 5 บนซ้าย) โดยมีมุมที่ตั้งค่าเป็นจุดเป้าหมายคือไปที่มุม 28 องศา(รูปที่ 5 บนขวา), 58 องศา(รูปที่ 5 ล่างซ้าย) และ 88 องศา(รูปที่ 5 ล่างขวา) ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบนี้ทำการทดสอบระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี, การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิม และการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอที่เพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ โดยที่มีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแต่ละแบบ ได้ค่าการจูนค่าพารามิเตอร์โดยผู้วิจัยดังแสดงใน ตารางที่ 2

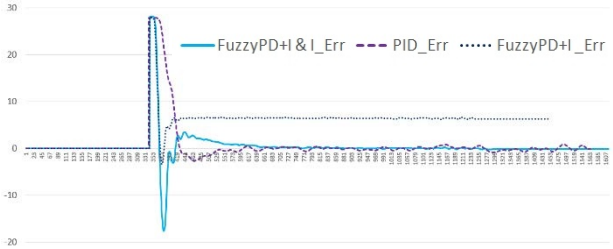
ตารางที่ 2 ค่าการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบต่างๆ

ตัวควบคุม	*FuzzyPD+I*					*PID*			*Gain*
	K_{pp}	K_i	K_p	K_d	L	K_p	K_i	K_d	
PID	-	-	-	-	-	1.5	0.07	60	1
FuzzyPD+I	16	1	3	85	600	-	-	-	32
FuzzyPD+I&I	16	1	3	85	600	-	0.05	-	32

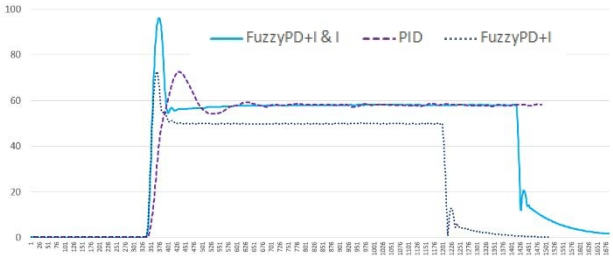
และผลการทดสอบระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 11 และตารางสรุปผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 3



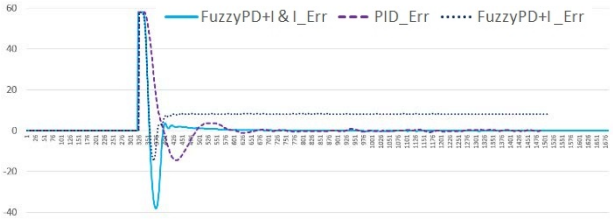
รูปที่ 6 ผลการควบคุมที่มุม 28 องศา



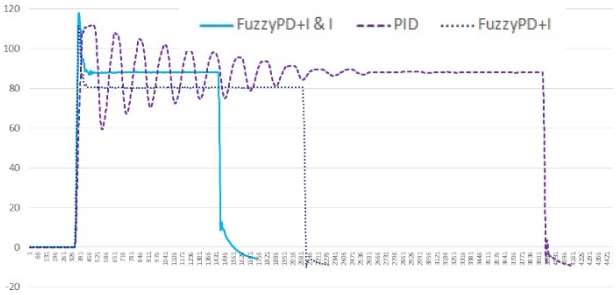
รูปที่ 7 ค่าผิดพลาดของการควบคุมที่มุม 28 องศา



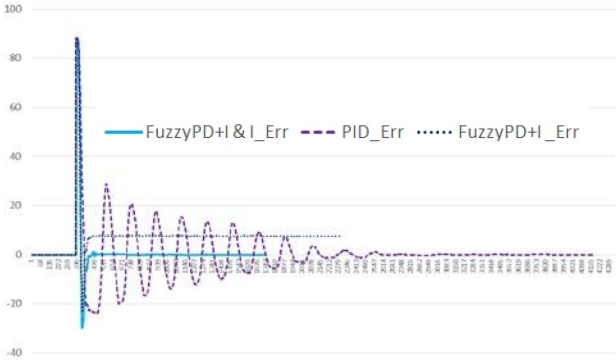
รูปที่ 8 ผลการควบคุมที่มุม 58 องศา



รูปที่ 9 ค่าผิดพลาดของการควบคุมที่มุม 58 องศา



รูปที่ 10 ผลการควบคุมที่มุม 88 องศา



รูปที่ 11 ค่าผิดพลาดของการควบคุมที่มุม 88 องศา

ตารางที่ 3 สรุปผลการทดสอบ

Control System	*Set Point (deg.)*	*Settling Angle(deg.)*		*Settling Time(Sec.)*
		Max.	*Min.*	
PID	28	30.7	27.9	2.6553
	58	72.5	54.3	5.8617
	88	111.9	59.2	37.7587
Fuzzy PD+I	28	31.3	21.6	1.1022
	58	72.6	49.8	1.6867
	88	111.5	80.5	1.9539
(Fuzzy PD+I) & I	28	45.2	24.8	4.1717
	58	95.9	55.0	3.3567
	88	117.7	87.0	1.1022

จากผลการทดสอบการควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุลด้วยตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง ถ้าหากค่าเริ่มต้นไปหายังจุดเป้าหมายไม่ห่างกันมากเกินไป ระบบก็จะมีการแกว่งเล็กน้อยก่อนเข้าสู่จุดเป้าหมาย แต่ถ้าหากค่าเริ่มต้นไปหายังจุดเป้าหมายมีค่าห่างกันมาก ระบบจะมีการแกว่งนาน แต่ก็ยังคงสู่เข้าหาจุดเป้าหมายได้ ส่วนตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิม จะมีปัญหาไม่สามารถควบคุมให้เข้าสู่จุดเป้าหมายได้ในทุกค่า จะเกิดค่า Offset ขึ้นอันเนื่องมาจากตัวควบคุมของระบบให้ค่าการควบคุมแล้วไม่มีผลทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ถ้าผิดพลาดยังคงเท่าเดิม และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดก็ไม่เปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิมนี้ ไม่สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่จุดเป้าหมายได้ ในภายหลังจึงเพิ่มพูนตัวควบคุมไอเข้าไปช่วยในตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอ จึงทำให้เกิดมีค่า Integral of error ขึ้น ทำให้ค่าการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีพลัสไอที่เพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอ สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่จุดเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

4. สรุป

การควบคุมคานทรงตัวแบบใบพัดปรับสมดุลด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ และเพิ่มพูนด้วยตัวควบคุมไอนี้ สามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่จุดเป้าหมายได้เป็นอย่างดี ซึ่งระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกคอนโทรลโดยทั่วไปจะใช้ในการควบคุมกับระบบที่ไม่มีโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ชัดเจน หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ตรรกคลุมเครือ และการออกแบบกฎการควบคุมโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งในการนำมาใช้กับระบบที่เป็นไดนามิคจะตอบสนองได้ดี และไม่ต้องปรับจูนค่าพารามิเตอร์การควบคุมบ่อยถ้าหากระบบมีการถูกรบกวนทำให้ขบวนการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และการเพิ่มพูนตัวควบคุมไอให้กับตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอแบบดั้งเดิมนี้ ทำให้ความสามารถในการควบคุมระบบให้เข้าสู่จุดเป้าหมายได้ดียิ่งขึ้น ทำให้การใช้งานตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอนี้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และยิ่งค่าผิดพลาดที่เริ่มต้นควบคุมมีค่ามากตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่จุดเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและมีค่าผิดพลาดที่น้อยกว่าอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Pattaradej T. 2003. “Implementation of fuzzy P^{2}ID controller” Master Thesis of King Mongkut’s Institute of Technology, Ladkrabang Bangkok.

[2] Sooraksa P., Pattaradej T. and Chen G. 2002. “Design and Implement of Fuzzy P^{2}ID Controller for Handlebar Control of Bicycle Robot.” Integrated Computer-Aided Engineering. Vol.9 : 319-331.

[3] ชาติ ฤทธิ์หิรัญ. “ การพัฒนาระบบควบคุมวิภัชนัยสำหรับการบินอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนบังคับ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2556.

[4] ชาติ ฤทธิ์หิรัญ และคณะ, “การพัฒนาระบบการนำทางของอากาศยานอัตโนมัติไร้คนบังคับ ด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีดีพลัสไอ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อยุธยา, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 1097 – 1100.