

การควบคุมระบบบอลและคานโดยใช้การประมวลผลภาพร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

Control of Ball and Beam System Using Image Processing with PID Controller and Fuzzy Logic Controller

ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ¹ นภัสดล สิงห์ตะ² เทิดศักดิ์ อินทโชติ³ กิตติศักดิ์ วาดสันทัด⁴ และ วิษณุ บุญญานุกูล⁵

วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 13180^{1, 2, 3, 4, 5}

E-mail: aunnkraisak@gmail.com¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมสมดุลของระบบบอลและคานซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมระบบจากตัวควบคุม 3 รูปแบบคือตัวควบคุมพีไอดี, ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก และตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดีที่มีการปรับค่าอัตราขยายแบบอัตโนมัติให้กับตัวควบคุม ในการทดสอบการทำงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยวิธีการของลากรางจ์และทดสอบจำลองการควบคุมตำแหน่งของบอลด้วยซอฟต์แวร์แมทแล็บ/ซิมูลิง ส่วนที่สองคือการใช้ซอฟต์แวร์แล็บวิวทดสอบควบคุมการทำงานของระบบจริงโดยการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพจากกล้องเว็บแคมเพื่อตรวจจับตำแหน่งจริงของบอลเพื่อป้อนกลับให้กับตัวควบคุม จากผลการทดสอบจำลองการทำงานและทดสอบระบบจริงพบว่าตัวควบคุมทั้งหมดสามารถควบคุมตำแหน่งของบอลได้และตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดีสามารถควบคุมให้บอลอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีการแกว่งและค่าความผิดพลาดของระบบน้อย

ที่สุด ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยกว่า 2 และ 3 วินาทีตามลำดับ

Abstract

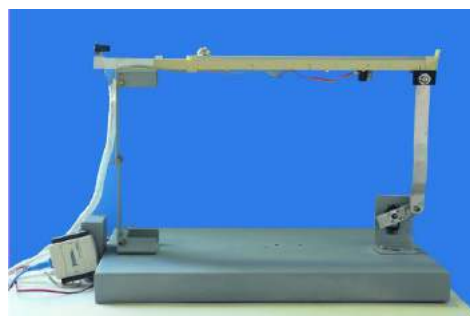
This paper presents the application of PID and fuzzy logic controllers for balancing control of ball and beam system that a nonlinear system. And then compared the results of system control from 3 controllers, PID controller, fuzzy logic controller and fuzzy-PID controller with automatic gain adjustment. The experiments can be divided into 2 parts. The first part is to find mathematical model of the system by the Lagrangian method and simulated the ball position control using MATLAB/Simulink software. The second part, LabVIEW software is implemented to test the real system control using image processing from web-cam to detect ball position and then feedback to the controller. The simulation and experimental results showed that all controllers

can control the ball position. The fuzzy-PID controller can control the ball to the desired position with least system swing and error that used time to the steady-state less than 2 and 3 seconds, respectively.

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบควบคุมแบบอัตโนมัติต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์เรามากขึ้น โดยการที่จะควบคุมนั้นจำเป็นต้องมีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับงานที่แตกต่างกันไป เพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน ซึ่งระบบบอลและคานเป็นระบบที่นิยมนำมาใช้ศึกษาทดสอบการควบคุมเนื่องด้วยเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ โดยบทความ [1-3] นำเสนอการทดสอบการควบคุมระบบบอลและคานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบผลของการควบคุม, [4-6] นำเสนอการทดสอบการควบคุมการทำงานจริงของระบบบอลและคานโดยมีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่แตกต่างกันเช่น LQR, PID และเลือกใช้บอร์ดตัวควบคุมหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ และประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของบอลและจากบทความ [7] แสดงดังรูปที่ 1 นำเสนอการใช้งานบอร์ดควบคุม NI DAQ ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์อินฟาเรด เพื่อใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งของบอล และใช้ดีซีเซอร์โวมอเตอร์เพื่อควบคุมก้านยกที่เชื่อมต่อกับคานสำหรับควบคุมตำแหน่งของบอลบนคาน โดยใช้

ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ที่มีจำนวนสองอินพุต สี่อินพุต และแบบสองลูปเพื่อเปรียบเทียบผลจากตัวควบคุมแต่ละชนิด ซึ่งพบว่าหากมีการใช้กฎการควบคุมที่มีจำนวนมากจะส่งผลให้เกิดการคำนวณที่ต้องใช้เวลานานขึ้นและส่งผลต่อการควบคุมระบบ



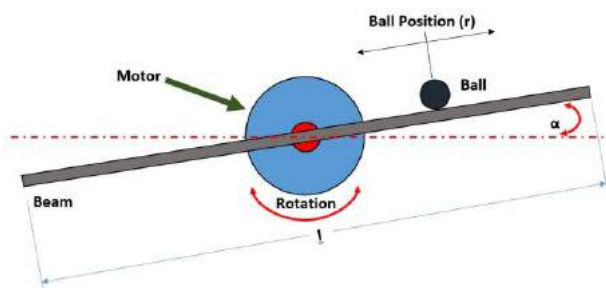
รูปที่ 1 ระบบบอลและคานจับตำแหน่งด้วยอินฟาเรด [7]

[8-12] นำเสนอการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพสำหรับการควบคุมระบบ โดยมีการใช้งานในหลากหลายรูปแบบเช่นการวิเคราะห์สภาพการจราจร เป็นต้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการประมวลผลและควบคุม

โดยบทความนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานและเปรียบเทียบผลการควบคุมระบบบอลและคานจากตัวควบคุมที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือตัวควบคุม PID, ตัวควบคุม Fuzzy และตัวควบคุม Fuzzy-PID ในการควบคุมตำแหน่งของบอลโดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบจำลองระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์ แมทแล็บ/ซิมมูลิง และการทดสอบการควบคุมระบบจริงโดยมีการประยุกต์ใช้งานการประมวลผลภาพจากกล้องเว็บแคมเพื่อตรวจจับและควบคุมตำแหน่งของบอลบนคาน ด้วยซอฟต์แวร์แลปวิว

2. อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

2.1 ระบบบอลและคาน



รูปที่ 2 ระบบบอลและคาน

จากรูปที่ 2 แสดงลักษณะอุปกรณ์และการทำงานของระบบบอลและคานประกอบไปด้วยคานมีความยาวเท่ากับ l ติดตั้งกับมอเตอร์เพื่อควบคุมมุมในการหมุน (α) และบอลที่เคลื่อนที่อยู่บนคานในลักษณะของการหมุนกลิ้งไป-มาที่ตำแหน่ง r โดยพิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของบอลนั้นไม่มีการลื่นไถลสามารถหาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ของบอลได้จากวิธีการของลากรางจ์ โดยพิจารณาจากพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) และพลังงานศักย์ (Potential Energy) ของระบบแสดงดังสมการที่ 1

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (1)$$

เมื่อ

$$L = K - P \quad (2)$$

โดยที่ L คือ ลากรางจ์ของระบบ (Lagrangian), K คือ พลังงานจลน์ของระบบ (Kinetic Energy), P คือ พลังงานศักย์ของระบบ (Potential Energy), q_i คือ ระบบพิกัดที่พิจารณา (Generalized System), Q_i คือ แรงในระบบพิกัดนั้นๆ ที่พิจารณา (Generalized Force)

จากพลังงานจลน์ของระบบ (K) สามารถแยกออกได้เป็น 2 ตัวคือ พลังงานจลน์ของคาน (K_{beam}) และพลังงานจลน์ของบอล (K_{ball}) หาได้จากสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ตามลำดับ

$$K_{beam} = \frac{1}{2} J_{beam} \dot{\alpha}^2 \quad (3)$$

โดยที่ J_{beam} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

$$K_{ball} = \frac{1}{2} \left(\frac{J_{ball}}{R_{ball}^2} + m_{ball} \right) \dot{r}^2 + \frac{1}{2} m_{ball} r^2 \dot{\alpha}^2 \quad (4)$$

โดยที่ J_{ball} คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของบอล, m_{ball} คือมวลของบอล และ R_{ball} คือรัศมีของบอล และพลังงาน-ศักย์ (P) ของระบบหาได้จากสมการที่ 5

$$P = m_{ball} g r \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

โดยที่ g คือค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นทำการแทนค่าพลังงานจลน์และพลังงานศักย์รวมของระบบจากสมการที่ 3, 4, 5, ลงในสมการที่ 2 จะได้

$$L = \frac{1}{2} \left(\frac{J_{ball}}{R_{ball}^2} + m_{ball} \right) \dot{r}^2 + \frac{1}{2} (m_{ball} r^2 + J_{beam}) \dot{\alpha}^2 - m_{ball} g r \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

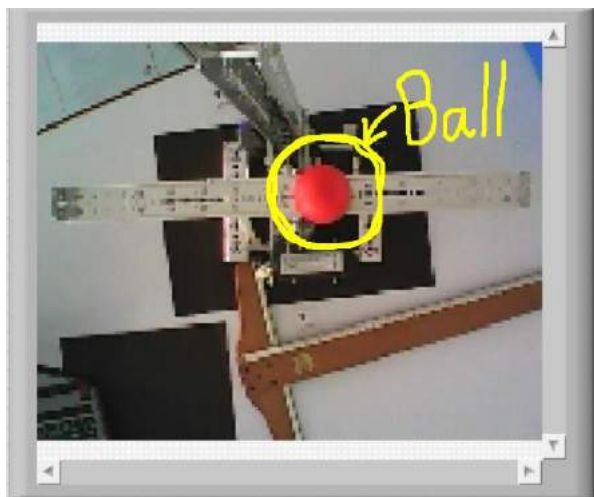
แทนค่าสมการที่ 6 ลงในสมการลากรางจ์ (สมการที่ 1) โดยพิจารณาเฉพาะบอลและจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้อง จะได้สมการการเคลื่อนที่ของบอลบนคานแสดงดังสมการที่ 7

$$\ddot{r} = \frac{-m_{ball} g \sin \alpha}{\left(\frac{J_{ball}}{R_{ball}^2} + m_{ball} \right)} \quad (7)$$

ซึ่งสมการที่ 7 จะถูกนำไปใช้กับตัวควบคุมรูปแบบต่างๆ เพื่อทดสอบการทำงานควบคุมตำแหน่งของบอลให้ได้ตามที่ต้องการ

2.2 การประมวลผลภาพ [13]

การประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นการนำเอาข้อมูลภาพดิจิทัลที่เป็นฟังก์ชัน 2 มิติ ($f(x, y)$) โดยที่ x และ y คือค่าที่ระบุพิกัดหรือตำแหน่งพิกเซลในภาพ และค่าของ f คือค่าความเข้มของแสงที่พิกัดนั้นๆ มาทำการประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การปรับปรุงภาพให้มีรายละเอียดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น หรือการประมวลผลจากภาพสีโดยใช้การแยกรูปแบบของสี หรือลักษณะที่สำคัญของภาพในส่วนที่สนใจเท่านั้น เพื่อสุดท้ายแล้วให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการเพื่อนำไปวิเคราะห์ให้ใช้งานต่อได้ทั้งในเชิงของปริมาณ และคุณภาพ ซึ่งในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคต่างๆ กับงานหลากหลายชนิด เช่น การประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบคุณภาพของสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม หรือการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์เพื่อการวินิจฉัยโรค เป็นต้น



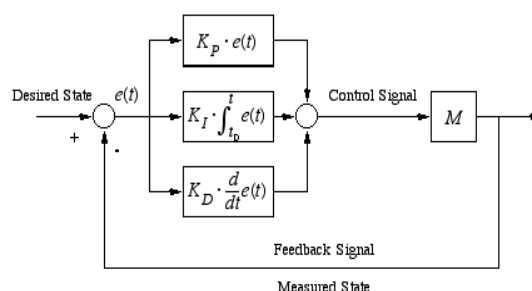
รูปที่ 3 การประมวลผลภาพเพื่อตรวจจับตำแหน่งบอล

โดยบทความนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานภาพ RGB 32 Bit ขนาด 320×240 พิกเซล ที่ได้จากกล้องเว็บแคม นำมาประมวลผลโดยการใช้เทคนิคติดตาม

รูปแบบสีที่ต้องการในภาพ (Color Pattern Matching) ด้วยชุดเครื่องมือประมวลผลภาพ Vision Assistant ของซอฟต์แวร์แลปวิว ซึ่งในที่นี้ใช้บอลสีแดงเป็นวัตถุเป้าหมายเพื่อควบคุมตำแหน่งให้อยู่บนคานในตำแหน่งพิกัดในภาพที่ต้องการ

2.3 ตัวควบคุม PID [15]

ตัวควบคุม PID จัดเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับรูปแบบหนึ่ง ซึ่งใช้การควบคุมแบบระบบวงปิด (Closed Loop Control) ที่ถูกนำมาใช้งานควบคุมระบบต่างๆ กันอย่างกว้างขวาง โดยเป็นการรับค่าความผิดพลาดของระบบ (Error) ซึ่งคำนวณมาจากค่าที่ต้องการ (Setpoint) กับค่าจริงที่ออกจากระบบ โดยที่ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความผิดพลาดของระบบให้เหลือน้อยที่สุดโดยการปรับค่าของสัญญาณควบคุม (Control Signal) ที่ป้อนให้กับระบบ (Plant) ซึ่งขึ้นกับอัตราขยายการควบคุม 3 ตัวคือการควบคุมแบบสัดส่วน (K_p), การควบคุมแบบปริพันธ์ (K_i) และการควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) โดยที่ทั้งหมดจะถูกนำมารวมกันเพื่อส่งเป็นสัญญาณควบคุมให้กับระบบต่อไป ดังการควบคุมแสดงดังรูปที่ 4

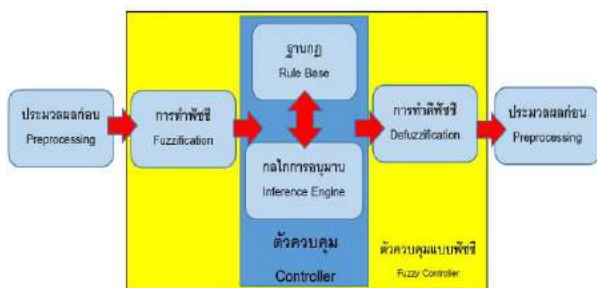


รูปที่ 4 ดังการควบคุมแบบ PID [15]

2.4 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก[16]

ฟัซซีลอจิกหรือตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นศาสตร์ด้านการคำนวณรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำ

มามีบทบาทมากขึ้น โดยได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย โดยตรรกะการคิดแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ป้อนให้กับระบบซึ่งมีวิธีการคิดและการตัดสินใจที่ยืดหยุ่นและซับซ้อน โดยโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแสดงดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย 3 ส่วนคือการแปลงข้อมูลอินพุตที่ฟัซซีรับเข้ามา (Fuzzification) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและจะถูกแทนด้วยตัวแปรทางภาษา, การวินิจฉัยตามกฎของฟัซซีและวิเคราะห์อินพุตตามเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้ (Fuzzy Inference) ซึ่งจะอยู่ในลักษณะของกฎ If-Then Rules และการแปลงค่าผลรวมเข้าที่ฟัซซีของแต่ละกฎของระบบให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานสำหรับการควบคุมได้ (Defuzzification)

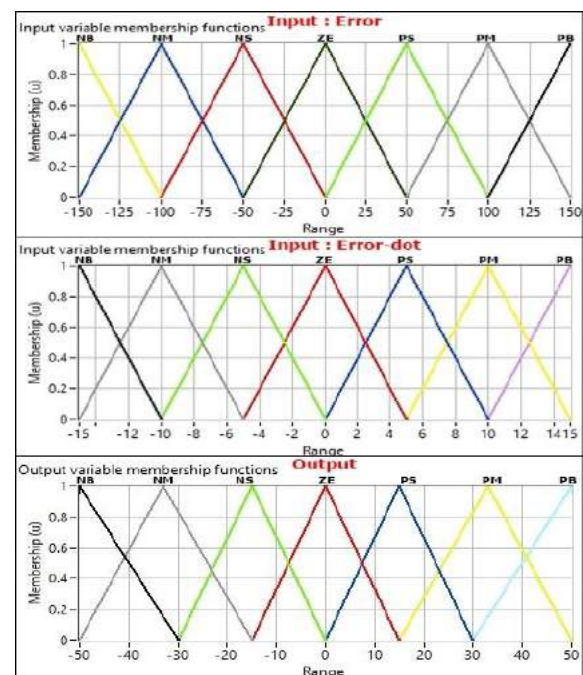


รูปที่ 5 การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก [16]

1) Fuzzy

ตัวควบคุม Fuzzy ใช้สำหรับควบคุมมุมของมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับคานเพื่อควบคุมตำแหน่งของบอลให้ได้ตามที่ต้องการ โดยรับค่าอินพุตจากระบบ 2 ตัวที่เป็นค่าความผิดพลาดตำแหน่งของบอล (Error) ระหว่างค่าตำแหน่งจริงกับค่าที่กำหนดไว้ (Ref) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM และ PB รับค่าอินพุตอยู่

ในช่วง -150 ถึง 150 ซึ่งเป็นค่าพิกัดของบอลในภาพและอินพุตตัวที่ 2 คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (Error-dot) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM และ PB รับค่าอินพุตอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 โดยหลังจากประมวลผลตามกฎของการควบคุมที่กำหนดไว้แสดงดังตารางที่ 1 แล้ว จะได้ค่าเข้าที่ฟัซซีสำหรับควบคุมระบบที่มีตัวแปรทางภาษา 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM และ PB โดยมีค่าเข้าที่ฟัซซีอยู่ในช่วง -50 ถึง 50 โดยที่ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตและเข้าที่ฟัซซีของ Fuzzy แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Fuzzy

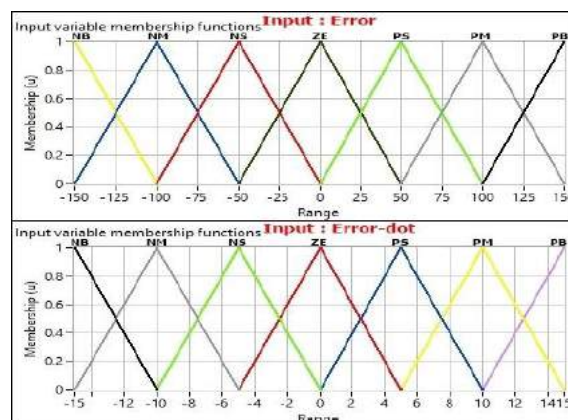
ตารางที่ 1 กฎในการควบคุมของ Fuzzy

Er dEr	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
NB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB
NM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
NS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE

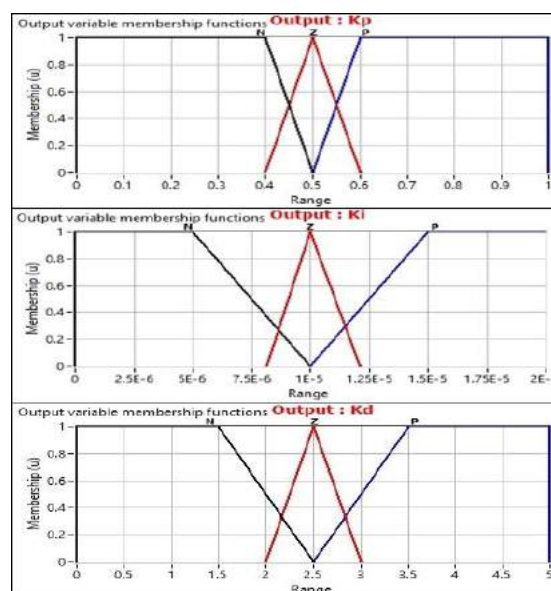
2) Fuzzy-PID

ตัวควบคุม Fuzzy-PID ใช้สำหรับควบคุมมุมของมอเตอร์เพื่อควบคุมตำแหน่งของบอลให้ได้ตามที่ต้องการเช่นเดียวกัน โดยเป็นการใช้งานร่วมกับตัวควบคุม PID เพื่อทำการปรับค่าอัตราขยายสำหรับการควบคุมระบบแบบอัตโนมัติเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการควบคุมระบบในขณะนั้นๆ และมีการรับค่าอินพุตจากระบบ 2 ตัวเหมือนกับตัวควบคุม Fuzzy คือค่าความผิดพลาดตำแหน่งของบอล (Error) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM และ PB รับค่าอินพุตอยู่ในช่วง -150 ถึง 150 และอินพุตตัวที่ 2 คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (Error-dot) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM และ PB รับค่าอินพุตอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 แสดงดังรูปที่ 7 โดยที่ค่าที่เข้าที่พุดที่ได้จากตัวควบคุมคือค่าอัตราขยายที่นำไปใช้กับตัวควบคุมพีไอดี มีทั้งหมด 3 ตัวคือ Kp, Ki และ Kd มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 3 ตัวคือ N, Z และ P โดยมีค่าเข้าที่พุดของแต่ละตัวอยู่ในช่วง 0 ถึง 1, 0 ถึง

0.00005 และ 0 ถึง 5 ตามลำดับ ซึ่งกฎที่ใช้สำหรับการควบคุมแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ Fuzzy-PID



รูปที่ 8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาท์พุตของ Fuzzy-PID

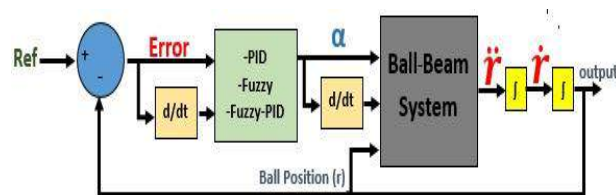
ตารางที่ 2 กฎในการควบคุมของ Fuzzy-PID

de	e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	Kp							
	Ki							
	Kd							
NB	P	Z	N	N	N	Z	P	
	N	P	P	N	P	P	N	
	P	Z	N	N	N	Z	P	
NM	P	P	Z	N	Z	P	P	
	N	Z	P	P	P	Z	N	
	P	Z	Z	N	Z	Z	P	
NS	P	P	Z	N	Z	P	P	
	N	N	Z	P	Z	N	N	
	P	P	Z	N	Z	P	P	
ZE	P	P	P	Z	P	P	P	
	N	N	N	Z	N	N	N	
	P	P	P	Z	P	P	P	
PS	P	P	Z	N	Z	P	P	
	N	N	Z	P	Z	N	N	
	P	P	Z	N	Z	P	P	
PM	P	P	Z	N	Z	P	P	
	N	Z	P	P	P	Z	N	
	P	Z	Z	N	Z	Z	P	
PB	P	Z	N	N	P	Z	P	
	N	P	P	P	N	P	N	
	P	Z	N	N	P	Z	P	

2.5 การจำลองการทำงานของระบบ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบอลและคานที่คำนวณหาได้จากสมการที่ 7 นำมาทำการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่และควบคุมตัวระบบด้วยซอฟต์แวร์แมทแลบ/ซิมูลิง เพื่อทดสอบตัวควบคุมรูปแบบต่างๆ คือ PID Controller, Fuzzy

และ Fuzzy-PID โดยได้อะแกรมการควบคุมการจำลองการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผังการจำลองการทำงานของระบบ

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ

ตัวแปร	คำอธิบาย	ขนาด	หน่วย
m_{ball}	มวลบอล	0.015	kg
R_{ball}	รัศมีบอล	0.02	m
J_{ball}	โมเมนต์ความเฉื่อยบอล	9.75×10^{-6}	$kg \cdot m^2$
l	ความยาวคาน	0.4	m
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง	9.81	m/s^2

โดยตารางที่ 3 คือค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่ใช้สำหรับทำการจำลองการเคลื่อนที่ โดยเริ่มต้นทำการกำหนดค่าตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้บอลรักษาค่าตำแหน่งบนคานไว้ (Setpoint) และนำมาหักลบกับค่าตำแหน่งจริงของบอลที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้เป็นค่าความผิดพลาดของตำแหน่งบอล (Error) นำมาหาอนุพันธ์ (d/dt) และส่งไปยังตัวควบคุมทั้ง 3 ตัวที่ใช้สำหรับควบคุมระบบ เพื่อส่งค่าสัญญาณควบคุมเป็นมุมหมุนของคาน (α) และความเร็วในการหมุนของคาน ($\dot{\alpha}$) ให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณหาตำแหน่งของบอลจากอินพุตที่ได้เพื่อ

ป้อนกลับและนำไปเทียบกับค่าสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการต่อไปดังรูปที่ 9

2.6 การทดสอบการทำงานจริงของระบบ

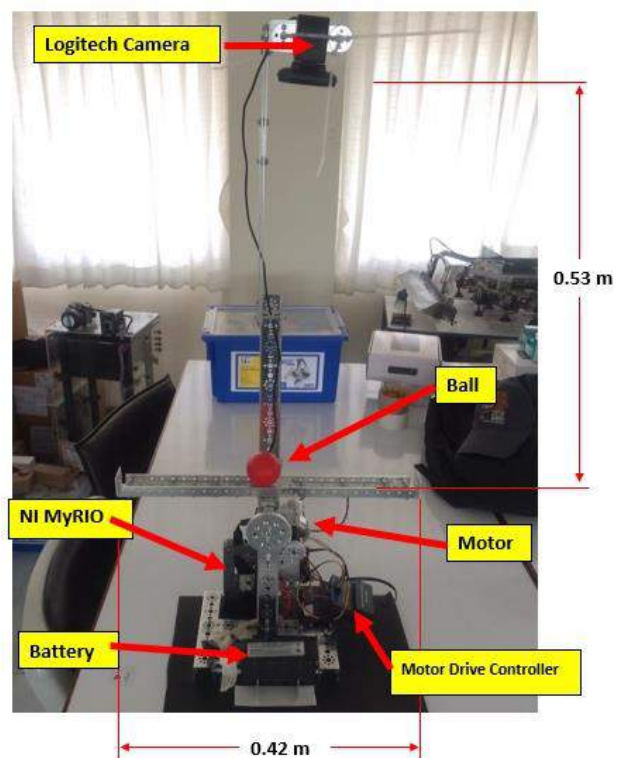
จากรูปที่ 10 แสดงไดอะแกรมสัญญาณการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการควบคุมระบบบอลและคานโดยตัวประมวลผลกลางและชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์จากแบตเตอรี่ ซึ่งเริ่มต้นระบบจะรับสัญญาณภาพจากกล้องเว็บแคม Logitech เชื่อมต่อกับตัวประมวลผลกลางคือบอร์ด NI MyRIO ด้วย USB เพื่อทำการประมวลผลจากภาพที่ได้ ติดตามตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายคือจุดศูนย์กลางของบอลสีแดง โดยเมื่อประมวลผลจากตัวควบคุมรูปแบบต่างๆ แล้ว จะส่งสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมุมหมุนของมอเตอร์เป็นสัญญาณ I2C ไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (DC Drive Controller) ที่ควบคุมมุมหมุนเชื่อมต่ออยู่กับชุดคาน โดยที่ตัวมอเตอร์มีเอ็นโค้ดเดอร์ป้อนกลับตำแหน่งมายังชุดขับเคลื่อนด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้ควบคุมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์แลปวิว เขียนโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์หลัก (Host Computer) โดยสามารถสื่อสารกับตัว



รูปที่ 10 การเชื่อมต่อการทำงานของอุปกรณ์

ประมวลผลกลางคือบอร์ด NI MyRIO ผ่านสัญญาณแบบไร้สาย (Wireless Signal) ได้

ในรูปที่ 11 แสดงลักษณะโครงสร้างของระบบบอลและคาน ที่ใช้สำหรับการทดสอบการทำงานจริง โดยประกอบไปด้วยบอลสีแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 เมตร และชุดคานขนาดความยาว 0.42 เมตร เชื่อมต่อกับมอเตอร์จากเกียร์ด้วยอัตราทด 1:2 เพื่อควบคุมมุมในการหมุนของชุดคาน และมีการติดตั้งกล้องเว็บแคมไว้ด้านบนสำหรับการประมวลผลภาพตรวจจับตำแหน่งของบอล ที่ระยะความสูง 0.53 เมตร จากชุดคานซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมที่กล้องเว็บแคมสามารถมองเห็นชุดบอลและคานได้อย่างชัดเจนทั่วทั้งระบบ

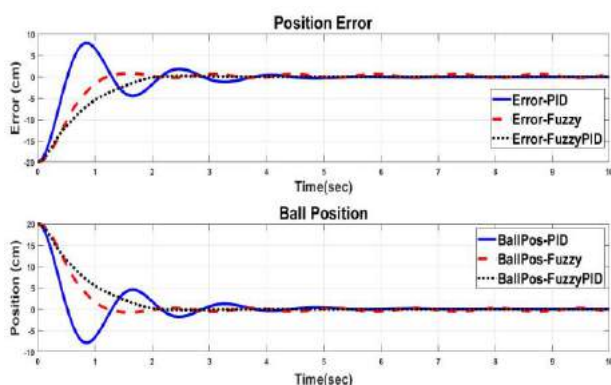


รูปที่ 11 อุปกรณ์ในการทดสอบการทำงานจริง

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบ

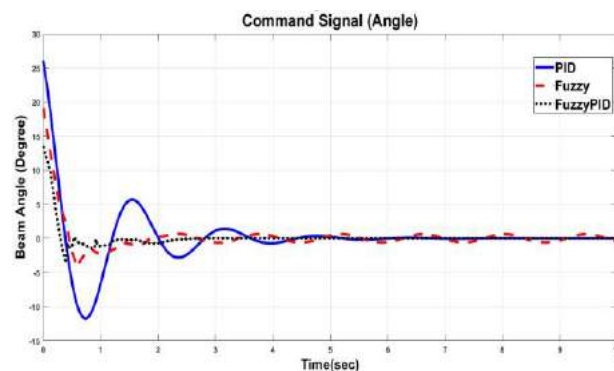
จากรูปที่ 12 แสดงค่าความผิดพลาดและตำแหน่งบอลจากการทดสอบจำลองการควบคุมตำแหน่งของบอลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบจากตารางที่ 3 โดยเปรียบเทียบผลจากตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบที่ทำการควบคุมตำแหน่งของบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการคือ ตัวควบคุม PID, ตัวควบคุม Fuzzy และตัวควบคุม Fuzzy-PID ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบสามารถควบคุมสมดุลตำแหน่งของบอลบนคาน ให้อยู่ในพิกัดที่ต้องการได้ โดยที่ตัวควบคุม Fuzzy-PID สามารถควบคุมตำแหน่งของบอลให้เข้าสู่สภาวะสมดุลได้ดีที่สุด โดยมีการแกว่งของตำแหน่งบอลน้อย ลำดับถัดมาคือตัวควบคุม Fuzzy ที่มีการปรับตำแหน่งเข้าสู่ค่าที่ต้องการรวดเร็วขึ้น โดยที่มีการแกว่งของตำแหน่งบอลมากกว่าและตัวควบคุม PID จะมีการแกว่งของตำแหน่งบอลก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุลและหลังจากนั้นเล็กน้อย



รูปที่ 12 ค่าความผิดพลาดและตำแหน่งของบอล (จำลอง)

รูปที่ 13 แสดงค่าสัญญาณการควบคุมมุมของคาน จากตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ โดยเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของบอลคือตัวควบคุม

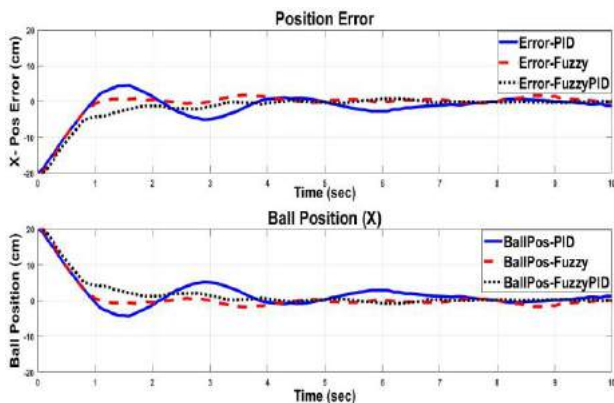
Fuzzy-PID ขณะเริ่มต้นมีการปรับตำแหน่งมุมของคาน เพื่อให้บอลไปยังตำแหน่งที่ต้องการแล้วมีการแกว่งเพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของบอลได้ดีกว่าตัวควบคุมอีก 2 ชนิด



รูปที่ 13 ค่าสัญญาณการควบคุม (จำลอง)

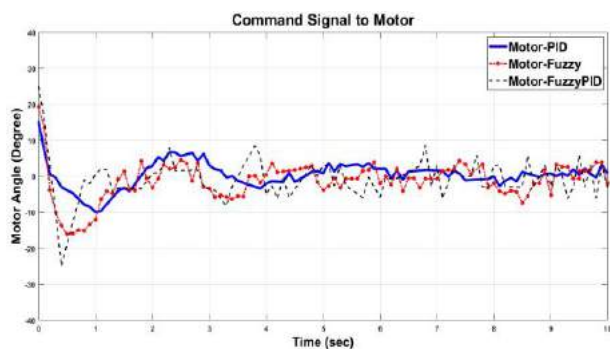
3.2 ผลการทดสอบการทำงานจริง

สำหรับการทดสอบระบบจริงการควบคุมตำแหน่งของบอลบนคานมีการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งดังรูปที่ 11 โดยจากรูปที่ 14 แสดงผลของค่าความผิดพลาดและตำแหน่งจริงของบอลซึ่งเห็นได้ว่าตัวควบคุม Fuzzy-PID สามารถควบคุมบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ดีที่สุด โดยระบบจริงมีความล่าช้ากว่าการทดสอบจำลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการควบคุมให้บอลเข้าสู่สภาวะคงตัวในตำแหน่งที่ต้องการ เนื่องมาจากการทดสอบจริงนั้น การเคลื่อนที่ของบอลบนคานมีการสั่นไถล เล็กน้อยในบางขณะ ทำให้การควบคุมมีความผิดพลาด และใช้เวลามากขึ้นในการควบคุมให้เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้



รูปที่ 14 ค่าความผิดพลาดและตำแหน่งของบอล
(ทดสอบจริง)

รูปที่ 15 แสดงค่าสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมุมของมอเตอร์ที่ติดตั้งกับคาน ของตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ โดยเส้นประสีดำของตัวควบคุม Fuzzy-PID มีการปรับมุมของมอเตอร์ละเอียดกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งเหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานจริงของระบบ ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งจริงของบอลบนคานให้เข้าสู่สภาวะสมดุลได้ดีที่สุด



รูปที่ 15 ค่าสัญญาณการควบคุม (ทดสอบจริง)

4. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการใช้ตัวควบคุม PID และตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับการควบคุมสมดุลของระบบบอลและคาน โดยทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมระบบจากตัวควบคุม 3 รูปแบบคือตัวควบคุม PID ที่มีการกำหนดค่าอัตราขยายที่เหมาะสม

ไว้, ตัวควบคุม Fuzzy ที่ทำการควบคุมค่าความผิดพลาดของระบบ จากกฎและเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ และสุดท้ายคือตัวควบคุม Fuzzy-PID ที่มีการใช้กฎการควบคุมของฟัซซี่มาทำการปรับค่าอัตราขยายแบบอัตโนมัติให้กับตัวควบคุม โดยการทดสอบการทำงานสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วนคือการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยวิธีการของลากรางจ์ เพื่อทดสอบตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบในการควบคุมตำแหน่งของบอลจากแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์แมทแลบ/ซิมูลิง และส่วนที่สองคือการทดสอบควบคุมการทำงานของระบบจริงโดยมีการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพจากกล้องเว็บแคมเพื่อตรวจจับตำแหน่งจริงของลูกบอลโดยการตรวจจับสีของบอลเพื่อทำการป้อนกลับให้กับตัวควบคุมในการคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์แลปวิว โดยจากผลการจำลองการทำงานและการทดสอบระบบจริงพบว่าตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบสามารถควบคุมตำแหน่งของบอลตามที่ต้องการได้โดยที่ตัวควบคุม Fuzzy-PID สามารถควบคุมให้บอลอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการโดยมีการแกว่งและค่าความผิดพลาดของระบบน้อยที่สุด ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวไม่เกิน 2 และ 3 วินาทีในการจำลองและการทดสอบการทำงานจริงตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ได้สนับสนุนห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนการอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Merin, M.S., Brindha, A. and Vimala, J.A. (2016). Design of Non-Linear Controller for a Ball and Beam System, *International Journal of Control Theory and Applications*, vol. 9(37), 2016, pp. 183–191.
- [2] Moezzi, R. and Minh, V.T. (2016). Fuzzy Logic Control for Non-Linear Model of the Ball and Beam System, paper presented in the 11th International DAAAM Baltic Conference “Industrial Engineering” 2016, Tallinn, Estonia.
- [3] Mani, M.P.V., Prabhakar, G. and Selvaperumal, S. (2016). Modelling and Control of Ball and Beam System using PID Controller, paper presented in the International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT) 2016, Tamilnadu, India.
- [4] Sitki, K. and Hilmi, K. (2013). Design and Control of PID-Controlled Ball and Beam System, paper presented in the International Scientific Conference UNITECH 2013, Gabrovo, Bulgaria.
- [5] Mohammad, K., Ali, F.J., Abolfazl, M., Mohammad, H.A. and Wen-Fang, X. (2012). Modeling and Control of Ball and Beam System Using Model Based and Non-Model Based Control Approaches, *International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 5(17), 2012, pp. 14–35.
- [6] สุกัต์ เบญจเลิศยานนท์, วรวิษ กุลพิชชีเกษม และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย (2557). การควบคุมระบบ บอลและคานโดยใช้วิธีการควบคุมเชิงทำนาย แบบจำลองด้วย Simulink และ บอร์ดควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์, การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, จังหวัดขอนแก่น.
- [7] มานพ ห่างภัย และ ชัยยพล ธงชัยสุรชาติกุล (2557). การควบคุมตำแหน่งของระบบบอลและ ปีมด้วยการควบคุมแบบฟัซซี่, *วารสารวิชาการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 24 ฉบับที่ 1*, มกราคม 2557, หน้า 1-14.
- [8] Karan, G. and Manpreet, S. (2016). Basics of Image Signal Processing, *Journal of Advanced Research in Image Processing and Applications*, 2016, pp. 20–24.
- [9] Yasmin, S.D., Marjorie, S.R., Aditya, P., Ranadeersai and Kumar, S. (2016). Detection and comparison of objects in image processing using labview, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, vol. 6, 2016, pp. 114–117.
- [10] Liqaa, S.M. (2016). Digital Image Processing Filtering with LABVIEW, *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCTST)*, vol. 4(4), 2016, pp. 278–282.

- [11] Aditya, K., and Abhijeet, K., (2012). Image Processing and Particle Analysis for Road Traffic Detection, International Journal of Computer Applications, vol. 55(2), 2012, pp. 26–32.
- [12] George., C.P., Alan, C.B. and Umesh, R. (2014). Image Processing for Everyone, available online: <http://citeseerx.ist.psu.viewdoc/download?doi=10.1.1.135.4922&rep=rep1&type=pdf>.
- [13] Jarat_cyberu. Image Processing เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://jaratcyberu.blogspot.com/2009/10/image-processing.html>, 12 มีนาคม 2560.
- [14] Digital Image Processing (การประมวลผลภาพ). [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.ecpe.nu.ac.th/panomkhawn/imagepro/pdf/ch01.pdf>, 1 พฤษภาคม 2560.
- [15] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. ระบบควบคุมฟuzzy. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมฟuzzy>, 7 กุมภาพันธ์ 2560.
- [16] Ae Suwaphan. ฟuzzy Logic. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.academia.edu/7750667/บทที่18ฟuzzyLogic>, 18 กุมภาพันธ์ 2560.