

การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการทรงตัวของหุ่นยนต์จักรยานสองล้อ  
โดยใช้ระบบการควบคุมพีไอดี  
Development and Stability Optimization of a Two-Wheeled Bicycle  
Robot Using PID Control System

เรวัฒน์ บุญจันทร์<sup>1</sup> ศิวพงษ์ กิ่งแก้ว<sup>1</sup> และอรรถสิทธิ์ วงศ์เจริญ<sup>1\*</sup>

Rewat Bunchan<sup>1</sup>, Siwapong Kingkaew<sup>1</sup> and Athasit Wongcharoen<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล ศูนย์พลังงานยั่งยืนและวัสดุวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Technology, Center of Sustainable Energy and Engineering Materials, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

\*Corresponding author: athasit.w@cit.kmutnb.ac.th

Received: February 29, 2024

Revised: May 2, 2024

Accepted: May 8, 2024

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอการพัฒนา และปรับแต่งหุ่นยนต์จักรยานสองล้อที่ทรงตัวได้เอง โดยใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative--PID โดยมีเป้าหมายในการรักษาความสมดุลและความเสถียรของหุ่นยนต์ ในขณะที่แสดงความยืดหยุ่นต่อสิ่งรบกวน ส่วนสำคัญของงานนี้คือการใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนในสัญญาณเซนเซอร์ที่ได้รับ ซึ่งช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและความแม่นยำของหุ่นยนต์ได้อย่างมาก งานนี้ได้ใช้ทฤษฎีของหุ่นยนต์และระบบควบคุม พร้อมการใช้งานจริงและการทดสอบ แนวทางการออกแบบตามแบบจำลองใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมของหุ่นยนต์จักรยาน ระบบควบคุม PID จะปรับการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์แบบพลวัต โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาสมดุลแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงสัญญาณรบกวนที่แท้จริงในการอ่านเซนเซอร์ ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ตัวกรองคาลมานจึงถูกรวมเข้าไว้ด้วยกัน เทคนิคการกรองขั้นสูงนี้ประเมินสถานะของระบบอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากสัญญาณที่ได้รับ ดังนั้นจึงปรับแต่งข้อมูลที่ใช้สำหรับการตัดสินใจควบคุม พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และตัวกรองคาลมานได้รับการปรับแต่งอย่างมีประสิทธิภาพของระบบที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้คือความสำเร็จของหุ่นยนต์จักรยาน การรักษาสมดุลและการนำทางที่มีประสิทธิภาพในพื้นที่ผิวและสภาวะต่าง ๆ การศึกษานี้มีการหาคำตอบที่ครอบคลุมสำหรับความสมดุลในการออกแบบหุ่นยนต์จักรยานสองล้อและลดสัญญาณรบกวนในสัญญาณควบคุม

**คำสำคัญ:** หุ่นยนต์จักรยานสองล้อ ระบบการควบคุมแบบพีไอดี หุ่นยนต์ทรงตัว ตัวกรองคาลมาน

## Abstract

In this study, a two-wheeled, self-balancing bicycle robot that is controlled by a Proportional-Integral-Derivative--PID control system is designed and evaluated. The objective of the project is to create a functioning bicycle robot that is stable and balanced. The primary difficulty in developing such a system is keeping the robot balanced under various operational circumstances and ensuring robustness against disturbances. The study examines the theoretical underpinnings of robotics and control systems, as well as their actual application and assessment. We simulate the behavior of the bicycle robot using a model-based design technique, and we use the PID control system immediately to modify its velocity to maintain it balanced. In order to ensure optimal performance, the PID controller parameters are carefully calibrated. Through simulation studies and physical testing, the effectiveness of the control strategy is confirmed. The results show that the bicycle robot is able to balance itself while controlling across a variety of surfaces and environmental conditions. This concept could have a variety of uses, by proposing an innovative method to self-balance in the development of two-wheeled robots. The study greatly expands the field of autonomous robotics.

**Keywords:** two-wheeled bicycle robot, PID control system, Balancing robot, Kalman filter



## บทนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์มีบทบาทมากในโลกปัจจุบันไม่เพียงแต่ใช้ในการอุตสาหกรรมเท่านั้น ยังใช้ในการขนส่ง รวมไปถึงหุ่นยนต์กู้ภัย (Kiyani & Khan, 2016) ยานพาหนะอัจฉริยะไร้คนขับ (Jeong & Takahashi, 2008) และอื่น ๆ หุ่นยนต์จักรยานทรงตัวเป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ชนิดหนึ่ง (Thanh & Parnichkun, 2008) หุ่นยนต์จักรยานทรงตัวได้รับการคิดค้นเพื่อช่วยเหลือกิจกรรมของมนุษย์ในการขนส่งผู้โดยสารในระยะทางสั้น ๆ ภายในเมือง (Osama, Mohsin, Yasar & Khubab, 2014) ลดอุบัติเหตุในการขับขี่ได้ในทั้งเด็กและผู้ใหญ่ ดังนั้นหุ่นยนต์จักรยานทรงตัวนำมาใช้เพื่อความปลอดภัยและการทรงตัวที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการบาดเจ็บทางร่างกาย ถึงแม้ว่าหุ่นยนต์สี่ล้อ (Jovina, Kenneth & Hou, 2022) อาจไม่ต้องการ การทรงตัวแต่ก็มีข้อจำกัดหลายอย่างการขนย้ายและไม่สามารถเข้าไปในที่แคบได้ ในทางตรงกันข้ามหุ่นยนต์จักรยานสามารถเดินทางไปในที่แคบได้ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามีนักวิทยาศาสตร์สนใจการวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์จักรยานสองล้อมากขึ้นเรื่อย ๆ ปัญหาในการควบคุมหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว คือ การทรงตัว

ด้วยตัวเอง แบบจำลองที่ไม่แน่นอน และผลกระทบของสัญญาณรบกวน (Ngoc & Hong, 2020) ทางผู้วิจัยจึงทำการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาการทรงตัวของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว

การควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว (Lin, Tsai & Huang, 2011) ควบคุมในตำแหน่งที่ตั้งตรงในลักษณะหุ่นยนต์จักรยานเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง โดยใช้หลักการทรงตัวของการบินบังคับเลี้ยวเมื่อจักรยานเคลื่อนที่ล้อที่หมุนอยู่จะสร้างแรงใจโรสโคป (Bernie, 2001) ที่ช่วยให้จักรยานทรงตัวได้ ขณะที่จักรยานเอียง แรงใจโรสโคป (Park, & Cho, 2018) ทำให้ล้อหน้าหมุนไปในทิศทางของการล้ม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการหมุนวนของใจโรสโคปิก (Gyroscopic precession) (Sun, Xu, Jiao & Wang, 2022) การเคลื่อนไหวในการเลี้ยวนี้สร้างแรงบิดเพื่อต้านแรงโน้มถ่วงที่ดึงจักรยานลง ช่วยรักษาสมดุลและทำให้จักรยานตั้งตรง

ในปัจจุบันมีการแข่งขันเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าที่สูงรวมไปถึงหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 2 ล้อ จึงได้เกิดเป็นงานหุ่นยนต์จักรยานทรงตัวขึ้นมาเพื่อลดปัญหาความปลอดภัยทางอากาศและเสียงในสภาวะที่น้ำมันเริ่มที่จะขาดแคลนและมีราคา

สูงขึ้นอีกทั้งยังช่วยลดอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นได้ในการเข้าโค้งในประเทศไทยสำหรับภาคอุตสาหกรรมทุกภาคส่วนเริ่มที่จะนำหุ่นยนต์อัตโนมัติมาช่วยกิจกรรมของมนุษย์ (Toshinobu, Ryoko & Shin'ichi, 2009) ทางผู้วิจัยเห็นว่าในประเทศไทยยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์จักรยานสองล้อไม่มากนัก จึงได้เกิดเป็นงานวิจัยขึ้นมาทางผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยจะสามารถเป็นรากฐานที่สำคัญในอนาคตสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 2 ล้อทรงตัวได้โดยไร้คนขับในอนาคตที่กำลังจะถึงนี้ และยังสามารถนำไปต่อยอดในงานอื่น ๆ ได้อีกด้วย ในส่วนที่สองจะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม แรง การเชื่อมโยงทางกล ตัวกรองคาลมาน และสมการทางคณิตศาสตร์ส่วนที่สาม อธิบายการเลือกส่วนประกอบฮาร์ดแวร์และคุณลักษณะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนที่สี่ กล่าวถึงการทดสอบทางกล สัญญาณของของเซนเซอร์การทดสอบตำแหน่ง IMU การทดสอบการทดสอบการเอียง การทดสอบการทำงานเมื่อใส่ค่า PID และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลการทดลองของการทรงตัวหุ่นยนต์จักรยานสองล้อ

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. ทฤษฎีการควบคุมการทรงตัว

หลักการควบคุมการทรงตัวในจักรยานทรงตัว (Damoon, Yang & Jingang, 2012) เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบระบบที่สามารถรักษาเสถียรภาพระหว่างเคลื่อนไหว การทรงตัวของผู้ปั่นนั้นหมายถึงการเปลี่ยนจุดศูนย์กลางมวลของระบบ ให้เอียงซ้ายหรือขวาตรงข้ามกับทิศทางที่กำลังจะล้ม ซึ่งส่วนนี้จะมีผลสำคัญที่สุดในสภาวะที่หยุดนิ่ง เพราะเป็นไปได้ที่ผู้ปั่นจะหยุดนิ่งให้จุดศูนย์กลางมวลอยู่ในแนวตรงตั้งได้ตลอดเวลา หนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้จักรยานมีความสมดุลคือผลกระทบของไจโรสโคปิก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อจักรยานเคลื่อนที่ ล้อหมุนสร้างแรงไจโรสโคปิก ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อเสถียรภาพของจักรยานและประสิทธิภาพโดยรวม

### แรงไจโรสโคปิก

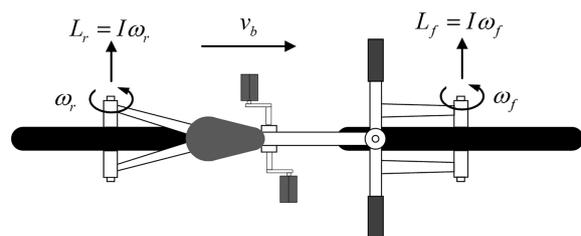
แรงไจโรสโคปิก (Sun, Xu, Jiao & Wang, 2022) สร้างขึ้นจากล้อที่หมุนของจักรยาน แรงนี้กระทำในแนวตั้งฉาก

กับระนาบการหมุนและช่วยรักษาสมดุลของจักรยาน เมื่อจักรยานอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ช้า ๆ แรงไจโรสโคปิกจะน้อยหรือมาก และจักรยานอาจเอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วของจักรยานเพิ่มขึ้นแรงไจโรสโคปิกจะมีความสำคัญมากขึ้นส่งผลให้จักรยานมีความเสถียรภาพดังภาพ 1

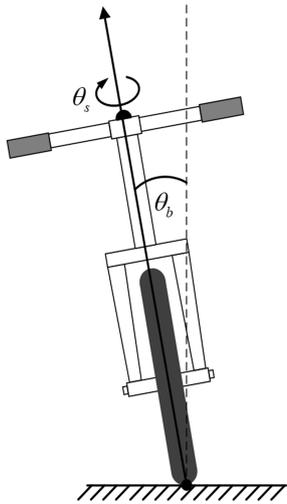
จากภาพ 1 ค่า  $v_b$  คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของจักรยาน, ค่า  $L_f, L_r$  คือ โมเมนต์ตัมเชิงมุมของล้อหน้าและล้อหลังของจักรยานตามลำดับ, ค่า  $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย และ ค่า  $\omega_f, \omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อหน้าและล้อหลัง เมื่อล้อรถจักรยานหมุนจะเกิดโมเมนต์ตัมเชิงมุมขึ้นในตำแหน่ง และทิศทางแสดงดังภาพ โมเมนต์ตัมเชิงมุมนี้จะทำให้ล้อจักรยานมีพฤติกรรมแบบไจโรสโคป ซึ่งจะช่วยให้อล้อจักรยานมีการทรงตัวที่ดีขึ้นจากโมเมนต์ตัมเชิงมุมที่ออกมาจากแกนล้อ

### แรงปฏิกิริยาจากพื้นถนน

แรงปฏิกิริยาจากพื้นถนน เป็นแรงปฏิกิริยาแนวตั้งขนาดเท่ากับน้ำหนักของจักรยาน โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของจักรยานไม่ใช่การวิ่งไปข้างหน้าเป็นเส้นตรง แต่จะเป็นอนุกรมของส่วนโค้งเล็ก ๆ ซึ่งแรงปฏิกิริยาจากพื้นถนนจะเป็นแรงหลักให้กลับสู่สมดุล สิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมแรงปฏิกิริยา คือ ล้อหน้าของจักรยานที่หมุนด้วยความเร็ว  $\omega_f$  หากจักรยานกำลังจะล้มไปทางซ้ายด้วยค่ามุม  $\theta_b$  จะต้องหักเลี้ยวไปทางซ้ายด้วยค่ามุม  $\theta_s$  เพื่อพลิกให้ตัวจักรยานกลับมาอยู่ในแนวตั้งตรงได้อีกครั้ง ดังภาพ 2 แรงปฏิกิริยาจากพื้นถนนนี้เป็นแรงที่มีบทบาทสำคัญในเกือบทุกสภาวะสังเกตว่าที่ความเร็วต่ำ ๆ หรือหยุดนิ่ง การหักแฮนด์จะช่วยให้จักรยานกลับมาทรงตัวได้ง่ายขึ้น



ภาพ 1 แรงไจโรสโคปิกของจักรยาน



ภาพ 2 แรงปฏิกิริยาจากพื้นถนน

### การป้อนกลับของพวงมาลัยและการรักษาสมดุล

การป้อนกลับของพวงมาลัยและการรักษาสมดุลของจักรยานที่ทรงตัวได้เอง กลไกการป้อนกลับของพวงมาลัยมีหน้าที่ตรวจจับมุมเอียงของจักรยานและทำการปรับมุมบังคับเลี้ยวที่จำเป็น ผลตอบรับนี้ช่วยให้จักรยานรักษาสมดุลโดยสร้างแรงยึดคืนที่ทำให้จักรยานกลับสู่ตำแหน่งตั้งตรง กระบวนการนี้มีความสำคัญต่อการสร้างความเสถียรภาพ การควบคุมระหว่างการเลี้ยวและการหลบหลีก

### สมดุลพลวัต

สมดุลพลวัตของจักรยานทรงตัว เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันระหว่างแรงต่าง ๆ เช่น แรงโน้มถ่วง ไจโรสโคปิก และแรงเหวี่ยง การทำความเข้าใจการทำงานร่วมกันระหว่างแรงเหล่านี้และผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพของจักรยานเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบระบบควบคุมการทรงตัวที่แข็งแกร่งและมีประสิทธิภาพ

## 2. การบังคับเลี้ยว (steering control)

จักรยานทรงตัวการควบคุมทิศทางเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาเสถียรภาพและความสมดุลระหว่างการ

เคลื่อนไหวเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย (Ozguner, Unyelioglu & Hatipoglu, 1995) จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ ที่มีแรงบิดเพียงพอเพื่อจัดการกลไกการบังคับเลี้ยวทำให้การควบคุมที่มีเสถียรภาพและตอบสนองขณะออกแบบระบบควบคุมทิศทาง สิ่งสำคัญคือต้องพิจารณาปัจจัยหลักสามประการนอกเหนือจากมุมเอียงและมุมบังคับเลี้ยว

### การเลือกเซอร์โวมอเตอร์

การเลือกเซอร์โวมอเตอร์ (Advance Electronic Training Center, 2017) ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมทิศทางที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำมอเตอร์ต้องมีแรงบิดเพียงพอที่จะจัดการกับแรงที่กระทำต่อกลไกการบังคับเลี้ยวระหว่างการบังคับเลี้ยวด้วยความเร็วสูงและการเลี้ยวหักศอก นอกจากนี้เซอร์โวมอเตอร์ควรมีเวลาตอบสนองที่รวดเร็วเพื่อให้การปรับตามเวลาจริงและรักษาสมดุลของจักรยาน

### การเชื่อมโยงทางกล

การเชื่อมโยงทางกลระหว่างเซอร์โวมอเตอร์และกลไกการบังคับเลี้ยวมีบทบาทสำคัญในการถ่ายโอนการเคลื่อนที่แบบหมุนของมอเตอร์ไปยังล้อหน้า การเชื่อมโยงนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อลดฟันเฟืองให้เหลือน้อยที่สุดและให้การส่งผ่านการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพ การเลือกใช้วัสดุและการออกแบบส่วนประกอบเชื่อมโยงควรคำนึงถึงการสึกหรอและการฉีกขาดตลอดจนความทนทานเมื่อเวลาผ่านไป

### พลวัตของการควบคุมทิศทาง

พลวัตของการบังคับเลี้ยวของจักรยานทรงตัวนั้น เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันระหว่างล้อหน้า กลไกบังคับเลี้ยว และความสมดุลรวมของจักรยาน (Wael & Mohammed, 2009) ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทั้งหมดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบควบคุมทิศทางที่ทนทานและมีประสิทธิภาพ ปัจจัยต่าง ๆ เช่น มุมล้อ เส้นทาง และรูปทรงของจักรยาน ล้วนส่งผลต่อพลวัตของการบังคับเลี้ยว และต้องได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบในระหว่างขั้นตอนการออกแบบ

### 3. ทฤษฎีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (PID controller)

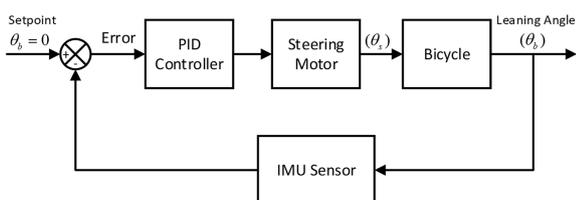
ตัวควบคุม PID (Kiam, Chong & Yun, 2005) เป็นรูปแบบที่ชดเชยความผิดพลาดของระบบ โดยมีตัวควบคุม P, I และ D ถือได้ว่าเป็นรูปแบบที่สามารถชดเชยค่าความผิดพลาด ตัวควบคุม PID มาตรฐาน เรียกอีกอย่างว่าตัวควบคุมสามเทอม ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนโดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปแบบขนาน ที่กำหนดโดยสมการที่ (1)

$$G(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (1)$$

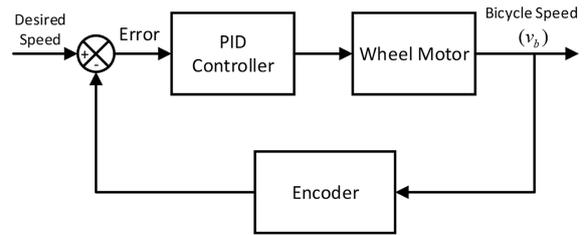
โดยที่  $K_p$  คือค่าเกนตามสัดส่วน  $K_I$  คือ ค่าเกนแบบอินทิกรัล  $K_D$  คือ ค่าเกนแบบอนุพันธ์ โดยฟังก์ชันสามเทอม มีดังต่อไปนี้ (1) เทอมตามค่าสัดส่วนให้การดำเนินการควบคุมโดยรวมตามสัดส่วนกับสัญญาณข้อผิดพลาดผ่านแฟกเตอร์เกนถูกรอบ (2) เทอมอินทิกรัลเป็นการลดข้อผิดพลาดในสถานะคงตัวผ่านการชดเชยความถี่ต่ำสำหรับตัวอินทิเกรต (3) เทอมอนุพันธ์จะปรับปรุงการตอบสนองชั่วคราวผ่านการชดเชยความถี่สูงโดยตัวสร้างความแตกต่าง

การออกแบบบล็อกไดอะแกรมควบคุมการบังคับเลี้ยวของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว ทำการควบคุมการบังคับเลี้ยวแบบพีไอดี (PID control steering) (Mohamed, Mo'men, Hossam & Raafat, 2020) เพื่อให้มอเตอร์บังคับเลี้ยวตอบสนองกับการเอียงของจักรยานทำให้จักรยานทรงตัวอยู่ในแนวตั้งได้ตลอดเวลา โดยการควบคุมให้ค่า  $\theta_b$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ดังภาพ 3

ทำการออกแบบบล็อกไดอะแกรมควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว ทำการควบคุมความเร็วแบบพีไอดี เพื่อให้ความเร็วของหุ่นยนต์จักรยานมีความเสถียร ดังภาพ 4



ภาพ 3 บล็อกไดอะแกรมควบคุมการบังคับเลี้ยว



ภาพ 4 บล็อกไดอะแกรมควบคุมความเร็วจักรยาน

### 4. โปรแกรมอาร์ดูโน IDE

อาร์ดูโน IDE คือ ซอฟต์แวร์เครื่องมือสำหรับพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C หรือ C++ สำหรับควบคุมบอร์ด อาร์ดูโน และเครื่องมือต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับใช้งานอาร์ดูโน IDE (Alisher & Zafar, 2022) คือซอฟต์แวร์ที่เป็นเครื่องมือสำหรับพัฒนาโปรแกรมซึ่งมีสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น RUN, Compile, DEBUG ซึ่งมี GUI ที่ถูกออกแบบมาให้มีสถานะแวดล้อม เหมาะสมกับการพัฒนาโปรแกรม โดยหน้าที่หลักของ IDE คือ การเขียนไฟล์ เปิดไฟล์ บันทึกไฟล์ ทดสอบการทำงาน จัดเตรียมข้อมูลรวมถึงจัดการ Directory สำหรับภาษานั้น ๆ ที่รองรับ

### 5. ตัวทรงคาลมาน

ตัวทรงคาลมาน (Qiang, Ranyang, Kaifan & Wei, 2015) เป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบควบคุมของจักรยานทรงตัว เนื่องจากถูกนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์ Inertial Measurement Unit—IMU (Norhafizan, Raja & Nazirah, 2013) เป็นอัลกอริทึมของการประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุดที่รวมการวัดเซนเซอร์ที่มีสัญญาณรบกวนเข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินสถานะของระบบ ในส่วนนี้เราจะศึกษาเกี่ยวกับหลักการ การนำไปใช้ และประโยชน์ของตัวทรงคาลมานในรูปแบบของจักรยานทรงตัว

#### หลักการของตัวทรงคาลมาน

หลักการของตัวทรงคาลมาน เป็นอัลกอริทึมการประมาณค่าแบบเรียกซ้ำที่ใช้กระบวนการสองขั้นตอน การคาดคะเนและการแก้ไข เพื่อประเมินสถานะที่แท้จริงของระบบพลวัต โดยรวมการวัดค่าจากเซนเซอร์เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยคำนึงถึงความไม่

แน่นอนทั้งในการวัดและแบบจำลอง ตัวกรองคาลมานใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของสถานะที่คาดการณ์และสถานะที่วัดได้เพื่ออัปเดตการประมาณค่า โดยน้ำหนักที่กำหนดโดยความไม่แน่นอนของแต่ละแหล่งที่มา

### การใช้งานจักษยานทรงตัว

การใช้งานจักษยานทรงตัวในจักษยานทรงตัว เซนเซอร์ IMU จะวัดทิศทางของจักษยาน ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม การวัดเหล่านี้มักจะมีสัญญาณรบกวนและอาจมีข้อผิดพลาดได้ ตัวกรองคาลมานถูกนำไปใช้กับข้อมูล IMU เพื่อประเมินการวางแนวและสถานะการเคลื่อนที่ที่แท้จริงของจักษยาน ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมสมดุลและทิศทางของจักษยานได้แม่นยำและเชื่อถือได้มากขึ้น

### สมการทางคณิตศาสตร์

พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ตัวกรองคาลมานขึ้นอยู่กับชุดของสมการเชิงเส้นที่อธิบายสถานะของระบบ การวัด และความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้อง สมการเหล่านี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก

(1) การทำนายสถานะ ขั้นตอนนี้ทำนายสถานะในอนาคตของระบบตามสถานะปัจจุบันและแบบจำลองพลวัตของระบบ นอกจากนี้ยังอัปเดตเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมซึ่งแสดงถึงความไม่แน่นอน

สมการทำนายสถานะ:

$$\hat{x}(k) = F \cdot \hat{x}(k-1) + B \cdot u \quad (2)$$

การทำนายความแปรปรวนร่วมที่ผิดพลาด:

$$P(k) = F \cdot P(k-1) \cdot F^T + Q \quad (3)$$

ในสมการการคาดการณ์ (Fengxin, Zhen & Haijiao, 2014) ตัวกรองจะทำนายสถานะปัจจุบัน  $\hat{x}(k)$  ตามค่าประมาณสถานะก่อนหน้า  $\hat{x}(k-1)$  และพลวัตของระบบที่แสดงโดยเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ  $F$  การคาดคะเนยังคงคำนึงถึงอินพุตควบคุม  $u$  ที่ใช้กับระบบซึ่งแสดงโดยเมทริกซ์ควบคุม  $B$  ความแปรปรวนร่วมของ

ข้อผิดพลาด  $P(k)$  ยังคาดการณ์ตามค่าประมาณความแปรปรวนร่วมที่ผิดพลาดก่อนหน้า  $P(k-1)$  เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ  $F$  และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนกระบวนการ  $Q$

การอัปเดตการวัด: ขั้นตอนนี้รวมสถานะที่คาดการณ์ไว้กับการวัดเซนเซอร์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของแหล่งที่มาทั้งสอง จากนั้นจะใช้ค่าประมาณสถานะที่อัปเดตเป็นอินพุตสำหรับขั้นตอนการคาดคะเนถัดไป สมการการแก้ไข นวัตกรรม:

$$y = z - H \cdot \hat{x}(k) \quad (4)$$

นวัตกรรมความแปรปรวนร่วม:

$$S = H \cdot P(k) \cdot H^T + R \quad (5)$$

คาลมานเกน:

$$K = P(k) \cdot H^T \cdot S^{-1} \quad (6)$$

อัปเดตสถานะ:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k) + K \cdot \ddot{a} \quad (7)$$

ข้อผิดพลาดในการอัปเดตความแปรปรวนร่วม:

$$P(k) = (I - K \cdot H) \cdot P(k) \quad (8)$$

ในสมการการแก้ไข ตัวกรองจะอัปเดตค่าประมาณสถานะและความแปรปรวนร่วมของข้อผิดพลาดตามการวัดปัจจุบัน ( $Z$ ) คือความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้และการวัดที่คาดการณ์ตามค่าประมาณสถานะปัจจุบัน ความแปรปรวนร่วมของ ( $S$ ) คำนวณจากความแปรปรวนร่วมของการวัดที่คาดการณ์ไว้ ( $H \cdot P(k) \cdot H^T$ ) ละเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนในการวัด ( $R$ ) คาลมานเกน ( $K$ ) กำหนดการมีส่วนร่วมของการวัดเพื่ออัปเดตสถานะสุดท้ายการประมาณสถานะและความแปรปรวนร่วมของข้อผิดพลาดจะได้รับการอัปเดตตามความแตกต่างระหว่างการวัดจริง การได้รับของคาลมาน และเมทริกซ์การวัด ( $H$ )

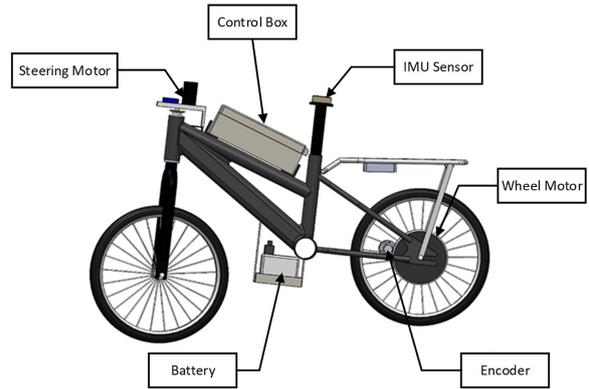
ในสมการข้างต้น  $Q$  แสดงถึงเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนกระบวนการ ซึ่งอธิบายความไม่แน่นอนในพลวัตของระบบและผลกระทบของปัจจัยที่ไม่ได้จำลอง  $R$  แสดงถึงเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนการวัด ซึ่งจับความไม่แน่นอนในการวัด

### วิธีการดำเนินงาน

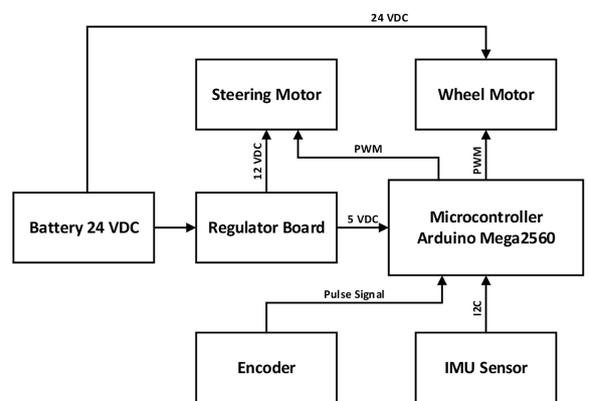
การดำเนินงานของวิจัยนี้จะเริ่มตั้งแต่การศึกษา ค้นคว้าข้อมูลและรวบรวมทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูล กำหนดขอบเขตการทำงาน ออกแบบโครงสร้าง จัดวางการติดตั้งอุปกรณ์บนโครงของจักรยาน ทดสอบใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งมีขั้นตอนการทำหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว ดังนี้

#### 1. ออกแบบโครงสร้าง

หุ่นยนต์จักรยานถูกออกแบบให้มีลักษณะ โดยมีความสูงประมาณ 80 ซม. ความยาว 100 ซม. ดังภาพ 5



ภาพ 5 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์จักรยาน

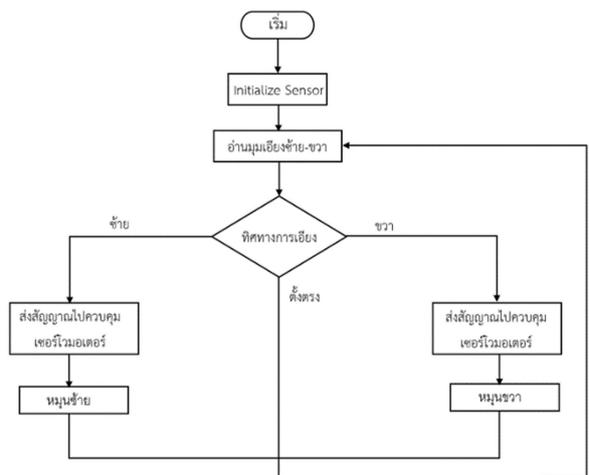


ภาพ 6 การออกแบบระบบไฟฟ้าของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว

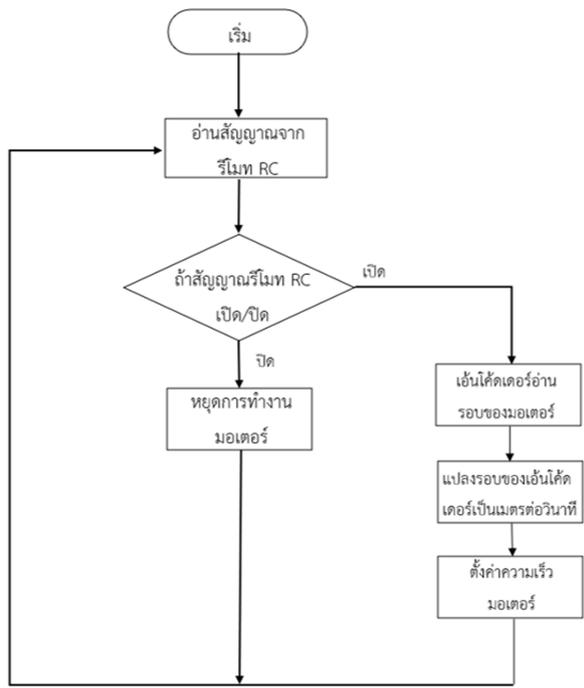
#### 2. การต่ออุปกรณ์และทดลองเขียนโค้ดควบคุมอุปกรณ์เบื้องต้น

การออกแบบระบบไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย การต่อวงจรเซนเซอร์ IMU การต่อใช้งานเซอร์โวมอเตอร์ 24 to 12VDC การต่อใช้งาน RC รีโมทคอนโทรล การต่อใช้งาน ตัวเข้ารหัสโรตารีแบบเพิ่มหน่วย การต่อใช้งานฮับมอเตอร์ ของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัว เข้ากับบอร์ดควบคุมอาร์ดูโน Mega 2560 โดยการต่อจะแสดงดังภาพ 6

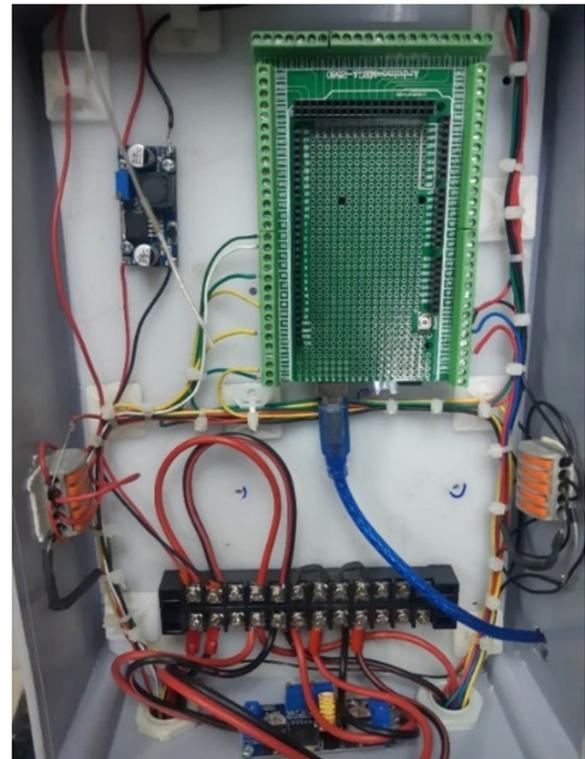
การทดลองเขียนโค้ดควบคุมอุปกรณ์เบื้องต้น โดยเขียนโปรแกรมควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้ไปในทิศทางองศาต่าง ๆ ทดลองเขียนโปรแกรมควบคุม เซนเซอร์ IMU สำหรับในการอ่านค่าความเร่งไจโรสโคป เพื่อให้การวางแนววัดที่ถูกต้อง แสดงผังงานโปรแกรมควบคุมทิศทางจักรยาน และผังงานโปรแกรมควบคุมความเร็วขับเคลื่อนจักรยาน ดังภาพ 7 และ 8 ตามลำดับ



ภาพ 7 แสดงผังงานโปรแกรมควบคุมทิศทางจักรยาน



ภาพ 8 แสดงผังงานโปรแกรมควบคุมความเร็วขับเคลื่อนจักรยาน



ภาพ 9 เดินสายไฟตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้

### 3. ขั้นตอนการประกอบโครงสร้าง

การวางแผนในการทำโครงสร้างนั้นผู้วิจัยจะทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ โดยจัดวางอุปกรณ์ให้อยู่ในจุดกึ่งกลางของตัวหุ่นยนต์จักรยานโดยให้น้ำหนักฝั่งซ้ายและฝั่งขวามีความสมดุลกันมากที่สุด ทำการเจาะยึดกล่องควบคุมมอเตอร์ หลังจากเจาะยึดกล่อง ควบคุมมอเตอร์เรียบร้อยแล้วทำการติดตั้งกล่องเพื่อเตรียม ใส่วงจรด้านใน หลังจากติดตั้งกล่องใส่วงจรเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการวางอุปกรณ์และเจาะยึดใส่แผ่นอะคริลิก แล้วติดตั้งอุปกรณ์บนแผ่นอะคริลิก จากนั้นเดินสายไฟตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้ ดังภาพ 9

หลังจากเดินสายไฟแล้วทำการประกอบติดตั้งมอเตอร์ชุดหน้าสำหรับบังคับเลี้ยว พร้อมทั้งทำการติดตั้งแบตเตอรี่และเบรกเกอร์ แล้วนำใส่กล่องให้เรียบร้อย ดังภาพ 10-11



ภาพ 10 การประกอบติดตั้งมอเตอร์ชุดหน้าสำหรับบังคับเลี้ยว



ภาพ 11 ติดตั้งแบตเตอรี่และเบรกเกอร์และนำใส่กล่องให้เรียบร้อย

## ผลการดำเนินงาน

การทดลองเพื่อทดลองการทรงตัว โดยการปรับค่าการควบคุม PID ของ Steering Control ความเร็วรอบของมอเตอร์ และการปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างหุ่นยนต์จักรยาน โดยมีการทดลอง ดังนี้

### 1. ผลการประกอบชิ้นส่วนและอุปกรณ์ทั้งหมด

ทางผู้วิจัยได้ทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดของหุ่นยนต์จักรยานทรงตัวโดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

(1) ผลการประกอบติดตั้งแบตเตอรี่ไว้ตรงกลางของจักรยาน ผลของการประกอบหุ่นยนต์จักรยานทรงตัวนำแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักมากที่สุดไว้ตรงกลางของจักรยานและติดตั้งไว้ที่ต่ำใกล้กับจุดศูนย์ถ่วงมากที่สุด การวางแบตเตอรี่ไว้ใกล้กับจุดนี้จะทำให้การกระจายน้ำหนักโดยรวมของจักรยานมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้สมดุลและเสถียรภาพดีขึ้น นี่เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับจักรยานทรงตัว เนื่องจากจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่และมอเตอร์

(2) ผลการประกอบชุดบังคับเลี้ยว ติดตั้งมอเตอร์บังคับเลี้ยวกับแฮนด์จักรยานที่ขับเคลื่อนด้วยสายพานโดยแกนบังคับเลี้ยวสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางคือการเลี้ยวซ้ายและการเลี้ยวขวาดังภาพ 12

(3) ผลการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระบบไฟฟ้า จากการทดลองเปิดใช้งานผ่านทางเบรกเกอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระบบไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ และสามารถปิดใช้งานด้วยเบรกเกอร์ได้

### 2. ทดสอบตัดสัญญาณรบกวนเซนเซอร์โดยใช้ตัวกรองคาบมาน

การกรองสัญญาณรบกวนโดยเฉพาะการใช้ตัวกรองคาบมาน คือเพื่อปรับปรุงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการวัดจากเซนเซอร์โดยการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวน ดังภาพ 13

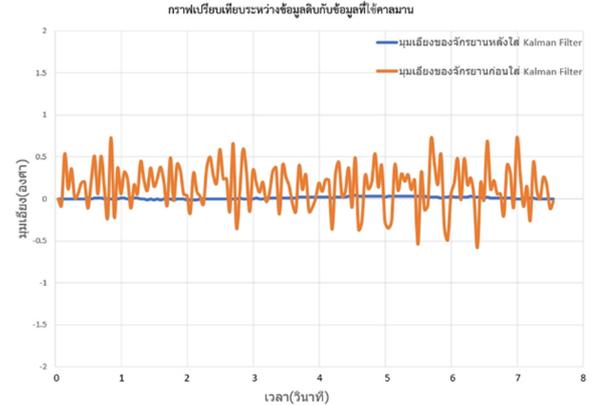
จากภาพ 14 สัญญาณรบกวนที่ไม่มีการกรองในการอ่านค่าของเซนเซอร์อาจส่งผลกระทบต่อความเสถียรในการทดสอบเซนเซอร์ในมาตรวัดความเร่งอยู่กับที่ ควรวัดความเร่งเป็นศูนย์ตามแกนทั้งหมด ลักษณะกราฟที่ได้จะไม่เสถียรทำให้กราฟที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นยอดแหลมอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน

จากภาพ 15 สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์นั้นไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ไม่มีความเสถียร จึงจำเป็นต้องใช้การกรองคาบมานเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัด จุดประสงค์ของการใช้ตัวกรองคาบมานคือเพื่อให้ได้สัญญาณที่แท้จริงของระบบตามการวัดเซนเซอร์ที่มีสัญญาณรบกวน เมื่อนำสัญญาณเซนเซอร์ที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณมาแล้วจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างเรียบมีความเป็นเส้นตรงดังภาพ 16

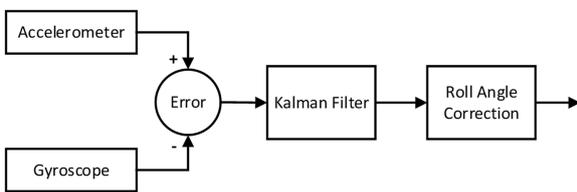
สัญญาณเซนเซอร์ที่ไม่มีการกรองสัญญาณ คือ การวัดข้อมูลดิบที่ได้รับโดยตรงจากเซนเซอร์ ในขณะที่สัญญาณเซนเซอร์ที่กรองแล้วช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือและความเสถียร โดยลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนและรูปแบบที่ไม่ต้องการ



ภาพ 12 โครงสร้างก่อนปรับปรุงแก้ไข



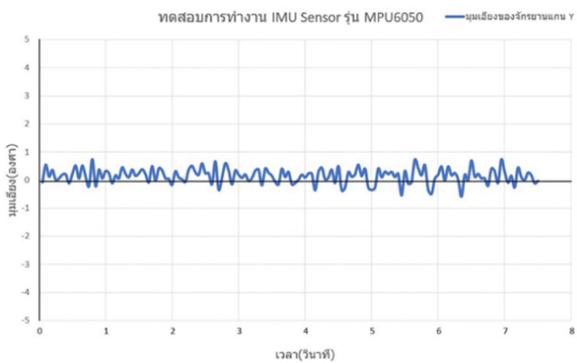
ภาพ 16 ผลการเปรียบเทียบการกรองสัญญาณ



ภาพ 13 บล็อกไดอะแกรมกรองสัญญาณแบบคาลมาน

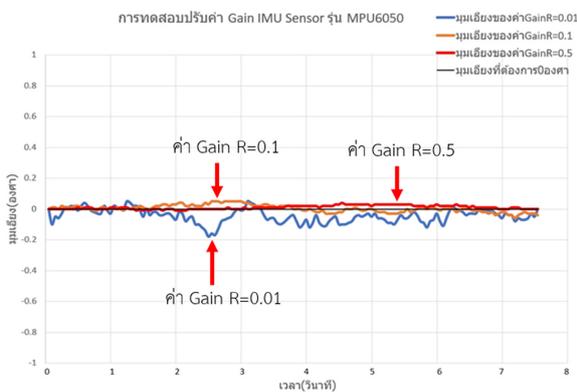
### 3 ทดสอบตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ IMU

การทดลองกับจุดติดตั้งเซนเซอร์ IMU เพื่อหาตำแหน่งที่ดีที่สุดเพื่อความแม่นยำในการวัดความเอียงหรือการวางแนวของจักรยานอย่างแม่นยำทั้งตำแหน่งและทิศทางของเซนเซอร์ อาจส่งผลต่อคุณภาพและความแม่นยำของการอ่านค่าจากเซนเซอร์ การทดสอบจุดติดตั้งต่าง ๆ สามารถประเมินได้ว่าตำแหน่งต่าง ๆ ส่งผลต่อความสามารถของเซนเซอร์ในการตรวจจับและวัดความเอียงหรือการวางแนวของจักรยาน การทดสอบนี้ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์และรับข้อมูลที่เชื่อถือได้และแม่นยำตามจุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 ดังภาพ 17



ภาพ 14 สัญญาณเซนเซอร์ที่ยังไม่ผ่านการกรอง

การทดสอบติดตั้งเซนเซอร์ IMU บนจักรยานไว้ที่ได้กล่องควบคุม ตำแหน่งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการสั่นสะเทือนและวางตำแหน่งเซนเซอร์ให้ใกล้กับจุดศูนย์กลางวงมากที่สุด อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญคือต้องทราบว่าเซนเซอร์ IMU ต้องใช้การเอียงอย่างมากเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของการเอียง ดังนั้นการติดตั้งที่จุดนี้อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากอาจให้ความไวที่ต้องการในการตรวจจับความเอียงที่เล็กน้อยอย่างแม่นยำ



ภาพ 15 ผลการกรองสัญญาณแบบคาลมาน

จากภาพ 18 ติดตั้งจุดที่ 1 จะสามารถลือตกราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดตั้งเซนเซอร์ IMU ไว้ได้กล่องควบคุม ปรากฏว่าค่าเซนเซอร์ IMU ที่แสดงจากกราฟมีผลตอบสนองช้า กล่าวคือจักรยานต้องเอียงมากจึงจะสามารถส่งข้อมูลได้ ดังภาพ 19

ทดสอบติดตั้งเซนเซอร์ IMU จุดที่สองวางไว้สูงกว่าตำแหน่งแรก โดยวางไว้บนกล่องควบคุม สำหรับการ

ทดสอบนี้ผลลัพธ์ระบุว่าเซนเซอร์ IMU ทำงานได้ดีขึ้นในตำแหน่งที่สองเมื่อเทียบกับตำแหน่งแรก อย่างไรก็ตาม การติดตั้งจุดนี้การสั่นสะเทือนที่เกิดจากกล่องคอนโทรล อาจทำให้ค่าความเอียงคลื่อนไปบ้าง ดังภาพ 20



ภาพ 17 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์



ภาพ 20 ทดลองติดตั้ง IMU จุดที่สอง

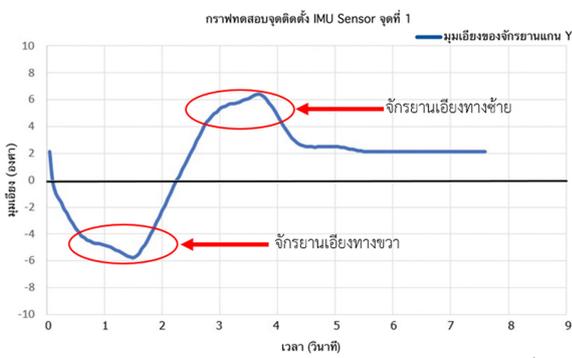
จากภาพ 20 จะสามารถลือตกราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดตั้งเซนเซอร์ IMU ไว้บนกล่องควบคุม ปรากฏว่าค่าเซนเซอร์ IMU ที่แสดงจากกราฟตอบสนองเร็วขึ้นมากกว่าติดตั้งไว้ตรงใต้กล่องควบคุม แต่มีการสั่นมากขึ้น เนื่องจากยึดไว้บนฝากล่องควบคุมที่ไม่มั่นคง ดังภาพ 21



ภาพ 18 ทดลองติดตั้ง IMU จุดแรก

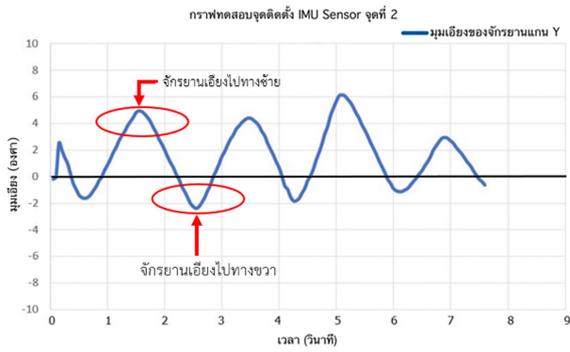
ทดสอบติดตั้งเซนเซอร์ IMU จุดที่สามโดยติดตั้งตรงที่นั่งเพื่อเพิ่มความสูงขึ้นจากตัวจักรยาน โดยวางเซนเซอร์ IMU ไว้จุดที่สูงที่สุด เมื่อติดตั้ง IMU ให้สูงบนที่นั่งของผู้ขับขี่ จักรยานจะตอบสนองเร็วต่อการเอียงมากขึ้น ความไวนี้เกิดจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจากจุดศูนย์ถ่วงของจักรยาน ซึ่งจะขยายผลกระทบของการเคลื่อนไหวแบบเอียง ดังภาพ 22

จากภาพ 22 จะสามารถลือตกราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดตั้งเซนเซอร์ IMU ไว้บนจุดสูงสุดของจักรยาน ผลปรากฏว่าค่าเซนเซอร์ IMU ที่แสดงจากกราฟมีผลตอบสนองที่เร็ว มีติเลย์ที่น้อยลง ดังภาพ 23

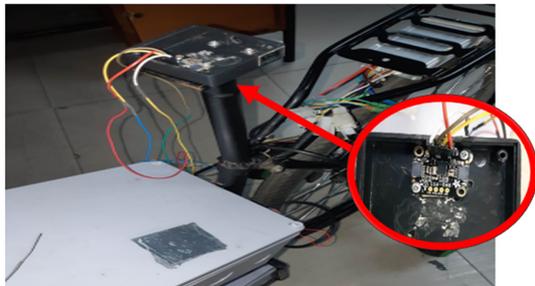


ภาพ 19 กราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดตั้งไว้ใต้กล่องคอนโทรล

โดยสรุปแล้ว การติดตั้ง IMU บนที่นั่งของผู้ขับขี่จักรยานซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่าจุดศูนย์ถ่วงของจักรยาน จะเพิ่มความไวต่อการเอียง ความไวนี้ช่วยให้วัดมุมเอียงของจักรยานได้อย่างแม่นยำ ช่วยให้ควบคุมการทรงตัวและปรับทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อรักษาเสถียรภาพ



ภาพ 21 กราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดไว้บนกล่องควบคุม



ภาพ 22 ทดลองติดตั้ง IMU จุดที่สาม



ภาพ 23 กราฟแสดงค่าของเซนเซอร์ IMU เมื่อติดไว้จุดสูงสุดของจักษยาน

#### 4. ทดสอบการเอียงของจักษยานและการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

ด้านการทรงตัวและการควบคุมจักษยาน ความเอียงของจักษยานจะวัดตามแนวแกนซ้าย-ขวา โดยที่ความเอียงด้านขวาถือเป็นค่าลบและค่าความเอียงทางด้านซ้าย

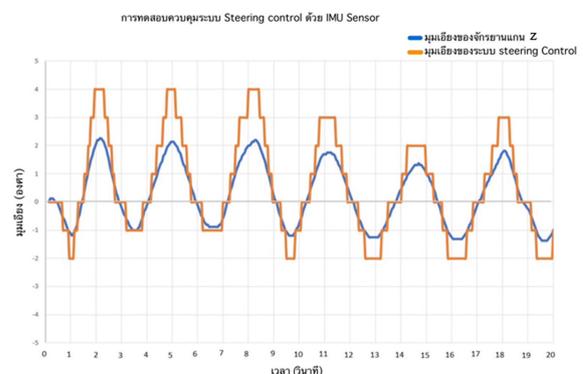
มีค่าเป็นบวก การบังคับเลี้ยวเมื่อจักษยานเอียงไปทางด้านขวา เซอร์โวมอเตอร์จะตอบสนองโดยการเลี้ยวพวงมาลัยด้านหน้าไปในทิศทางเดียวกับแรงดันตก ซึ่งก็คือไปทางขวา การดำเนินการนี้จะช่วยให้จักษยานมีความสมดุลและป้องกันไม่ให้ล้มลง

จากภาพ 24 เมื่อทำการพล็อตกราฟผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างมุมบังคับเลี้ยวและการวัดความเอียงของเซนเซอร์เมื่อจักษยานเอียงไปทางขวา (เอียงเป็นลบ) มุมบังคับเลี้ยวจะแสดงถึงการเลี้ยวไปทางขวาที่สอดคล้องกันในทำนองเดียวกันเมื่อจักษยานเอียงไปทางซ้าย (เอียงเป็นบวก) มุมบังคับเลี้ยวจะตอบสนองด้วยการเลี้ยวไปทางซ้าย

#### 5 ทดสอบการทำงานเมื่อใส่ค่าการควบคุม PID ของทิศทางความเร็วขับเคลื่อน

โดยความเร็วที่ใช้ในการทดสอบการทรงตัวคือ 2 เมตรต่อวินาที การทดลองปรับจูนค่าการควบคุม PID การทดลองครั้งที่ 1 ดังตาราง 1

จากภาพ 25 ในการทดลองนี้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID สำหรับระบบบังคับเลี้ยวถูกตั้งค่าเป็น  $K_p = 0.1$   $K_i = 0.001$  และ  $K_d = 0.01$  ผลการทดลองระบุว่าจักษยานทรงตัวไม่สามารถรักษาสมดุลได้ สาเหตุหลักมาจากการตอบสนองช้าต่อการเอียง การตอบสนองที่ช้านี้อาจจะเนื่องมาจากค่าเกณฑ์ PID ที่เลือก ซึ่งอาจไม่ได้รับการปรับให้เหมาะสมจึงทำให้จักษยานล้ม

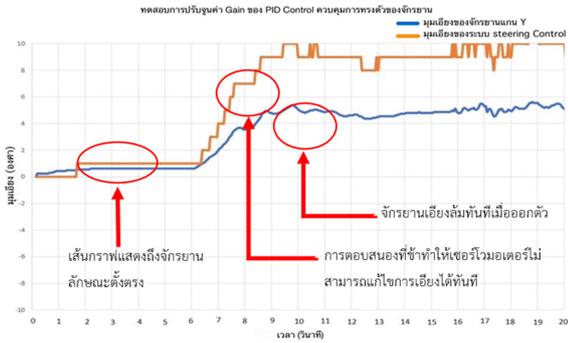


ภาพ 24 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์การบังคับเลี้ยวที่สั่งงานโดยเซนเซอร์ IMU

ตาราง 1

PID Steering Control ครั้งที่ 1

Kp Steering	Ki Steering	Kd Steering
0.1	0.001	0.01



ภาพ 25 แสดงค่ากราฟการทำงานการตอบสนองการเอียงที่ช้าทำให้เอียงล้ม

จากตาราง 2 และภาพ 26 ผลลัพธ์ของการทดลองครั้งที่สองแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงในการตอบสนองของจิกยานต่อการเอียง โดยเพิ่มค่า Kp เป็น 0.8 และค่า Kd เป็น 0.1 อย่างไรก็ตามการประมวลผลยังช้าเกินไปและระบบบังคับเลี้ยวไม่สามารถตอบสนองได้เร็วพอที่จะป้องกันไม่ให้จิกยานล้ม เมื่อจิกยานเอียง คำสั่งการบังคับเลี้ยวจะล่าช้า ทำให้จิกยานไม่มีแรงต้านที่จำเป็นในการนำจิกยานกลับสู่ตำแหน่งตั้งตรง

จากตาราง 3 และภาพ 27 ผลลัพธ์ของการทดลองครั้งที่สามแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงโดยเพิ่มค่า Kp เป็น 1.5 เพิ่มเติมในการตอบสนองของจิกยานต่อการเอียงเมื่อเทียบกับการทดลองครั้งก่อน อย่างไรก็ตาม การประมวลผลยังไม่เร็วพอ และระบบบังคับเลี้ยวไม่สามารถตอบสนองได้เร็วพอที่จะป้องกันไม่ให้จิกยานล้ม เมื่อจิกยานเอียง คำสั่งการบังคับเลี้ยวจะล่าช้า ทำให้จิกยานไม่มีแรงต้านที่จำเป็นในการนำจิกยานกลับสู่ตำแหน่งตั้งตรง แรงที่เพิ่มขึ้นที่กระทำต่อจิกยานนั้นไม่เพียงพอที่จะพยุงจิกยานให้ตั้งตรงได้

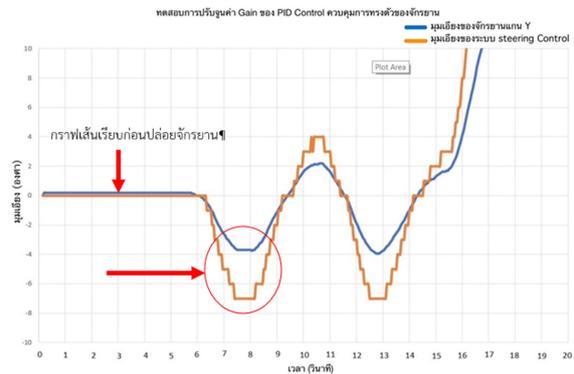
จากตาราง 4 และภาพ 28 ผลลัพธ์ของการทดลองครั้งที่สี่แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงโดยเพิ่มค่า Kp เป็น 2 ระบบมีการตอบสนองที่ดีขึ้น จิกยานสามารถทรงตัวได้แต่

ยังมีปัญหาเมื่อเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่มีหลุมหรือขรุขระจะทำให้เกิดการโอเวอร์ชูตต้องทดสอบเพิ่ม โดยการเพิ่ม Kd เพื่อลดการโอเวอร์ชูตเมื่อเกิดการสั่นสะเทือน

ตาราง 2

PID Steering Control ครั้งที่ 2

Kp Steering	Ki Steering	Kd Steering
0.8	0.001	0.1

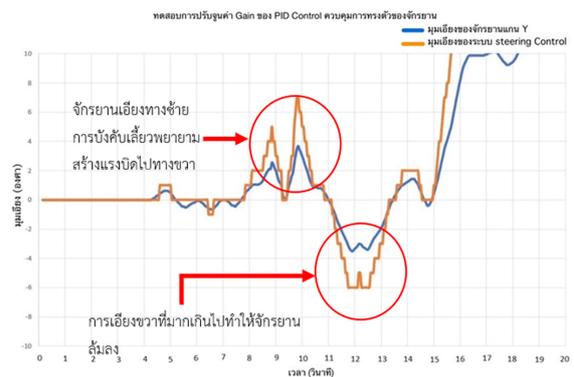


ภาพ 26 แสดงค่ากราฟปรับแกนพีไอดีครั้งที่ 2

ตาราง 3

PID Steering Control ครั้งที่ 3

Kp Steering	Ki Steering	Kd Steering
1.5	0.001	0.1

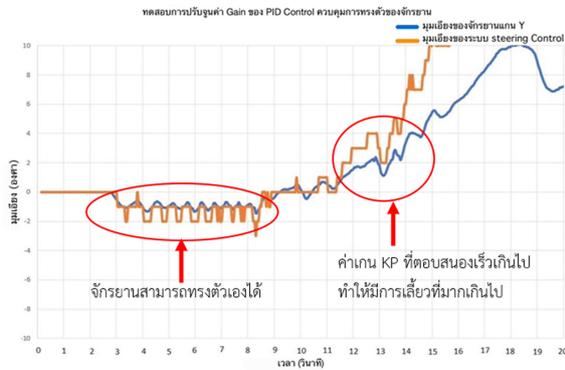


ภาพ 27 แสดงค่ากราฟปรับแกนพีไอดีครั้งที่ 3

ตาราง 4

PID Steering Control ครั้งที่ 4

Kp Steering	Ki Steering	Kd Steering
2	0.001	0.1



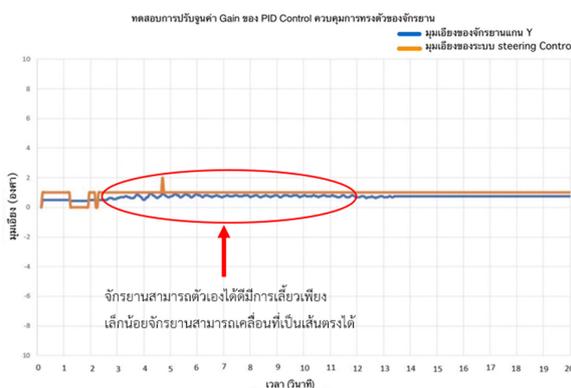
ภาพ 28 แสดงค่ากราฟปรับเกนพีไอดีครั้งที่ 4

จากตาราง 5 และภาพ 29 ผลลัพธ์ของการทดลองครั้งที่ห้า แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงโดยการเพิ่มอัตราขยาย Kd เป็น 0.81 ในระบบควบคุมการทรงตัวของจักรยานสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถการทรงตัวได้ดียิ่งขึ้นและลดการเลี้ยวที่มากเกินไปเมื่อพบกับหลุมหรือพื้นที่ขรุขระ

ตาราง 5

PID Steering Control ครั้งที่ 5

Kp Steering	Ki Steering	Kd Steering
2	0.001	0.81



ภาพ 29 แสดงค่ากราฟการทำงานการตอบสนองที่เริ่มไวขึ้น

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองปรับแต่งค่าอัตราขยายการควบคุมพีไอดีตามสัญญาณการตอบสนองของมุมเอียงที่เกิดขึ้น เพื่อชดเชยมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีหลักการ แสดงให้เห็นการปรับปรุงที่สำคัญในประสิทธิภาพการทรงตัวของจักรยานยนต์ด้วยค่า  $K_p=2$   $K_i=0.001$  และ  $K_d=0.81$  ที่ปรับแล้ว ค่า  $K_d$  ที่สูงขึ้นทำให้ระบบบังคับเลี้ยวของจักรยานสามารถสั่งให้จักรยานเลี้ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งให้การรองรับและความมั่นคงที่เพียงพอสำหรับตัวจักรยาน ส่งผลให้จักรยานเคลื่อนไหวได้นุ่มนวลและมั่นคงยิ่งขึ้นในระยะทางที่ไกลขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้จะปรับปรุงประสิทธิภาพการทรงตัวแล้ว การเคลื่อนไหวของจักรยานทรงตัวยังขาดทิศทาง ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มเติมในระบบควบคุมทิศทางหรือกลยุทธ์การนำทางเพื่อให้ได้การเคลื่อนไหวที่แม่นยำและควบคุมได้มากขึ้นในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างจักรยานทรงตัวเป็นความพยายามที่ซับซ้อนและท้าทาย ต้องใช้ความพยายามอย่างอุตสาหะ ซึ่งต้องอาศัยความเชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมเครื่องกล ระบบควบคุม การรวมเซนเซอร์ การพัฒนาซอฟต์แวร์ และการทดสอบ การจัดการกับความท้าทายเหล่านี้และปรับแต่งการออกแบบผ่านการปรับปรุงซ้ำ ๆ เป็นกุญแจสำคัญในการสร้างจักรยานทรงตัวที่เชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพ



## References

- Advance Electronic Training Center. (2017). *Servo motor*. Retrieved from <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/86/th/> (in Thai)
- Alisher, S. I., & Zafar J., (2022). Study of arduino microcontroller board. *Science and Education Scientific Journal*, 3(3), 172-179. <https://bit.ly/3W6lKwp>
- Bernie, G. (2001). Gyroscopes. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 4(3), 49-52. doi: 10.1109/5289.953462.
- Damoon, S., Yang, Z., & Jingang, Y., (2012). Stability analysis of human rider's balance control of stationary bicycles. *2012 American Control Conference (ACC)* (pp. 2755-2760). Canada: IEEE. doi: 10.1109/ACC.2012.6315425.
- Fengxin, S., Zhen, Y., & Haijiao, Y. (2014). A design for two-wheeled self-balancing robot based on Kalman filter and LQR. *International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)* (pp. 612-616). Jinzhou, China: IEEE. doi: 10.1109/ICMC.2014.7231628.
- Jeong, S., & Takahashi, T. (2008). Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control. *Intel Serv Robotics*, 1, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s11370-008-0024-5>.
- Jovina, S. L. L., Kenneth, T. K. T., & Hou P. Y., (2022). Four wheeled mobile robots: A review. *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAJET)* (pp. 1-6). Malaysia: IEEE. doi: 10.1109/IICAJET55139.2022.9936855.
- Kiam, H. A., Chong, G., & Yun, L. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *In IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576. doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- Kiyani, M. N., & Khan, M. U. M., (2016). A prototype of search and rescue robot. *The 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)* (pp. 208-213). Rawalpindi: IEEE. doi: 10.1109/ICRAI.2016.7791255.
- Lin, S. C., Tsai, C. C., & Huang, H. C., (2011). Adaptive robust self-balancing and steering of a two-wheeled human transportation vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 62, 103–123. <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9460-5>.
- Mohamed, E. A., Mo'men, A., Hossam, H. A., & Raafat, S., (2020). Steering control for autonomous vehicles using PID control with gradient descent tuning and behavioral cloning. *2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conf. (NILES)* (pp. 583-587). Giza, Egypt: IEEE. doi: 10.1109/NILES50944.2020.9257946.
- Ngoc, K. V., & Hong, Q. N., (2020). Balancing control of two-wheel bicycle problems. mathematical problems. *Engineering*, 2020, 6724382. <https://doi.org/10.1155/2020/6724382>.
- Norhafizan, A., Raja, A. R. G., & Nazirah, M. K., (2013). Reviews on various Inertial Measurement Unit (IMU) sensor applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262. doi:10.12720/ijsp.1.2.256-262

- Osama, J., Mohsin, J., Yasar, A., & Khubab, A. (2014). Modeling, control of a two-wheeled self-balancing robot. *International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE)* (pp. 191-199). Islamabad: IEEE. doi:10.1109/iCREATE.2014.6828364.
- Ozguner, U., Unyelioglu, K. A., & Hatipoglu, C., (1995). An analytical study of vehicle steering control. *Proceedings of International Conference on Control Applications* (pp. 125-130). NY, USA: IEEE. doi: 10.1109/CCA.1995.555653.
- Park, J., & Cho, B. (2018)., Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(2), 172988141877086. doi:10.1177/1729881418770865
- Qiang, L., Ranyang, L., Kaifan, J., & Wei, D. (2015). Kalman Filter and Its Application. *8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)* (pp. 74-77). Tianjin, China: IEEE. doi: 10.1109/ICINIS.2015.35.
- Sun, J., Xu, T., Jiao, Z., & Wang, H., (2022). Mechanics of the gyroscopic precession and calculation of the galactic mass. *Journal of Modern Physics*, 13, 34-45. doi:10.4236/jmp.2022.131003.
- Thanh, B. T., & Parnichkun, M., (2008). Balancing control of bicyrobo by particle swarm optimization-based structure-specified mixed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(4), 6235. <https://doi.org/10.5772/6235>.
- Toshinobu, T., Ryoko, I., & Shin'ichi, Y., (2009). Baggage Transportation and Navigation by a Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56, 10, 3985-3994. doi: 10.1109/TIE.2009.2027252.
- Wael, Y., & Mohammed, A., (2009). Design and implementation of an experimental segway model. *AIP Conference Proceedings*, 1107, 350–354. <https://doi.org/10.1063/1.3106501>.

