

รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle based on Inverted Pendulum Mechanism

ธนพงษ์ นพวงศ์ ณ อยุธยา¹ และ ไพฑูรย์ รักเหลือ²
tanapong.n@en.rmutt.ac.th¹, paitoon_r@rmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ที่มีความไวและเสถียรภาพสูงโดยใช้การตรวจจับแบบไดนามิกหรือ Gyroscope เพื่อวัดความเอียงในกรณีรถเคลื่อนที่ร่วมกับตัวตรวจวัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงหรือ Accelerometer และการวัดความเอียงแบบอยู่กับที่ (Static Sensing) ตามลำดับ ตัวตรวจจับความเอียงทั้งสองตัวนี้ของรถถูกควบคุมผ่านบอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino รับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเอียงของรถจากทั้ง RATE Gyroscope และ Accelerometer เพื่อนำค่าสัญญาณมาวิเคราะห์เพื่อไปสั่งการทำงานของมอเตอร์เพื่อรักษาการทรงตัวแบบสมดุลและการเคลื่อนที่ของรถสองล้อต้นแบบ ในส่วนของกระบวนการทดสอบค่าสัญญาณเอาต์พุตของ RATE Gyroscope มีผลที่แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าความเร็วเชิงมุม ส่วนผลการการทดสอบค่าสัญญาณเอาต์พุตจาก Accelerometer จะเปรียบเทียบกับความเอียงของตัวรถสองล้อซึ่งสัญญาณเอาต์พุตดังกล่าวมีความแปรผันตรงกับมุมเอียงของรถสองล้อแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัติได้นำรถสองล้อต้นแบบมาทำการทดสอบการทรงตัวเมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำ รถสองล้อต้นแบบตั้งอยู่ในตำแหน่งการทรงตัวที่สมดุล เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้รถสองล้อต้นแบบเกิดการเอียงขึ้นจากแนวสมดุลทำให้ตัวตรวจจับความเอียงทั้งสองตัวส่งสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปมายังบอร์ด Arduino เพื่อไปสั่งการขับเคลื่อนให้ล้อของรถยนต์สองล้อต้นแบบให้กลับมาอยู่ตำแหน่งสมดุลเหมือนเดิม รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum นี้มีราคาต่ำกว่ารายการละเอียดน้อยกว่าและน้ำหนักเบากว่ารถยนต์สองล้อที่มีขายเชิงธุรกิจทั่วไปและยังเหมาะกับการนำไปใช้เป็นพาหนะส่วนบุคคลในปัจจุบันได้ด้วย

คำสำคัญ: รถยนต์สองล้อ Inverted Pendulum บอร์ด Arduino Gyroscope Accelerometer

^{1,2} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

This article presents Two-wheeled self-balancing vehicle based on inverted pendulum, which has high sensitivity and stability using dynamic sensor, gyroscope, and static sensor, accelerometer to determine tilt angle of moving situation and staying situation, respectively. Both tilt angle sensors of proposed vehicle are controlled via Arduino board. The Arduino board gets a changing tilt angle of two-wheeled self-balancing vehicle from RATE Gyroscope and Accelerometer in order to analyse signal to drive motor for self-balancing and movement of proposed vehicle. In term of measurement procedure, the measured output signal results of RATE Gyroscope is linearly direct variation with angular velocity. Furthermore, the accelerometer's output signal results is non-linearly direct variation compared with tilt angle of two-wheeled self-balancing vehicle. Practically, the proposed two-wheeled vehicle is examined balancing test depending on external force. When the external force is not exist, proposed two-wheeled self-balancing vehicle stays still at balance position. In other way, when the proposed vehicle is executed by the external force execute, the proposed vehicle becomes tilt from balancing axis cause both sensors detect tilt angle and sent the output signal to Arduino board to drive motor of proposed two-wheeled vehicle for being balancing position again. Finally, Two-wheeled self-balancing vehicle based on inverted pendulum offer low-cost, low-profiles and light-weight alternatives to commercially two-wheeled vehicle and also suitable use as a personal vehicle presently.

Keywords: Two-Wheeled Vehicle, Inverted Pendulum, Arduino Board, Gyroscope, and Accelerometer

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทรงตัวของวัตถุได้มีการพัฒนามากยิ่งขึ้นและถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น สิ่งปลูกสร้างในอาคารบ้านเรือน หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม และยานพาหนะ เป็นต้น โดยเริ่มแรกในปี ค.ศ. 1990 ดีน คาเมน (Dean Kamen) นักประดิษฐ์ได้มีการเริ่มความคิดที่จะสร้างระบบขนส่งส่วนบุคคลแบบใหม่ที่มีชื่อว่า Segway Human Transporter (Segway HT) [1] ซึ่งเป็นยานพาหนะที่มีสองล้อวางขนานในแนวเดียวกันแต่ละล้อ

ขับเคลื่อนแยกกันอย่างอิสระ แต่สิ่งที่สำคัญมากคือส่วนที่ทำให้ยานพาหนะสมดุลได้ทั้งในกรณีที่มีหรือไม่มีคนขับซึ่งการควบคุมสมดุลนี้ทำได้โดยการตรวจสอบสัญญาณป้อนกลับจากเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงและไจโรสโคป (Gyroscope) ส่งสัญญาณมายังตัวควบคุม ซึ่งต่อมาเป็นเดอ ลาสัน (Bender Larson) [2] ได้ทำการพัฒนาหุ่นรักษาสมดุลที่มีน้ำหนักเบาและสามารถประกอบและดัดแปลงได้ง่าย โดยใช้ไจโรสโคปร่วมกับข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งสองแกนเพื่อที่ได้ข้อมูลที่แม่นยำและ

เที่ยงตรง ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีเสถียรภาพในการควบคุมมากขึ้น [3] ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ที่มีตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller) รับสัญญาณป้อนกลับจากไจโรสโคปแบบเปียโซอีเล็กทริก มอเตอร์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ส่วนในงานวิจัยของ เดวิด แอนเดอร์สัน (David P. Anderson) [4] ที่มีชื่อว่า nBot Balancing Robot เป็นหุ่นยนต์ต้นแบบขับเคลื่อนสองล้อแบบสมดุลที่ใช้หลักการอินเวอร์ทแพนดูลัม (Inverted Pendulum) ที่มีความไวและเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งใช้การทำงานร่วมกันของ Gyroscope กับ Accelerometer วัดมุมเอียงเป็นองศาเพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ HC11 ได้โดยตรงซึ่งไม่ต้องเสียเวลาในการคำนวณค่ามุม ซึ่งประมวลผลโดยใช้การป้อนกลับแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์

ระบบ Inverted Pendulum เป็นระบบหนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทและใช้งานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีการทรงตัวของรถสองล้อ โดยมีหลักการทำงานคือการรักษาก้าน Pendulum ให้อยู่ตำแหน่งตั้งฉากกับแกนหรือแกน Pendulum เพื่อรักษาสมดุล โดยบทความของ Grasser [5] ได้นำเสนอพาหนะที่รักษาสมดุลของผู้ขับขี่บนรถ 2 ล้อที่อยู่บนแกนเดียวกันโดยใช้ระบบ Inverted Pendulum โดยใช้การประมวลผลจาก Gyroscope และตัวเข้ารหัสอินครีเมนทัล (Incremental Encoder) ส่วนในการวัดความเอียงได้มีการนำเสนอการใช้ Gyroscope และ Accelerometer เป็นเซนเซอร์แบบไดนามิก (Dynamic Sensing) และเซนเซอร์แบบสถิติก (Static Sensing) ตามลำดับ [6] เพื่อเสถียรภาพในการทรงตัว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าระบบ Inverted Pendulum เป็นอีกระบบหนึ่งที่ถูกใช้

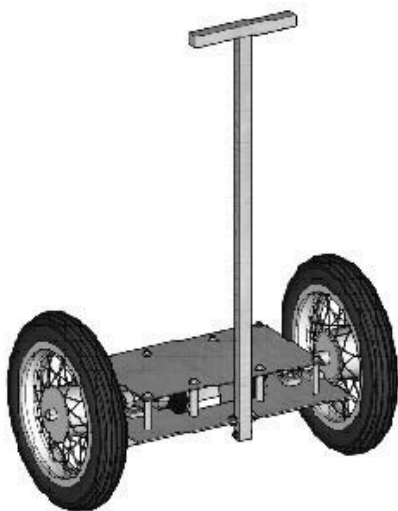
ในการรักษาสมดุลของหุ่นยนต์ 2 ล้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำหลักการรักษาสมดุลของระบบ Inverted Pendulum มาประยุกต์ใช้กับการทรงตัวและการเคลื่อนที่ของรถต้นแบบ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์และส่วนประกอบของตัวรถต้นแบบจะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป ส่วนหัวข้อที่ 3 และ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการวัดทดสอบ และการวัดสัญญาณขาออกของแต่ละอุปกรณ์และเสถียรภาพการทรงตัวของตัวรถ ตามลำดับ

2. การออกแบบ อุปกรณ์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบทางกลศาสตร์ การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ และการออกแบบทางซอฟต์แวร์ รวมถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรักษาสมดุลไม่ว่าจะเป็นหลักการ Inverted Pendulum ตัว Gyroscope และตัว Accelerometer เป็นต้น

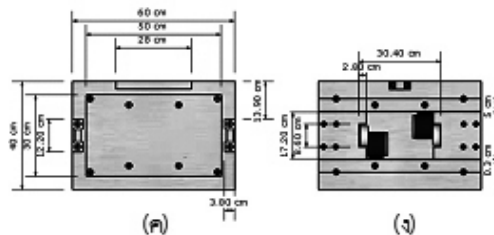
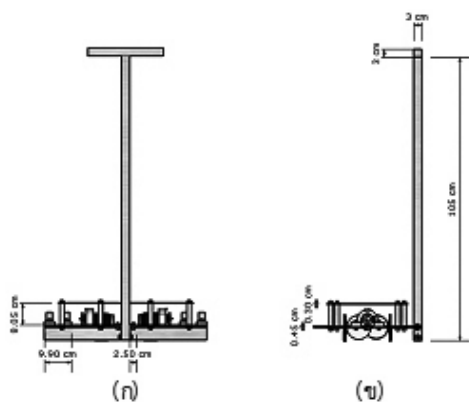
2.1 การออกแบบทางกลศาสตร์

การออกแบบทางกลศาสตร์เป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งโดยต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆด้าน อีกทั้งต้องอยู่ภายใต้กฎตามหลักการทางฟิสิกส์ โครงสร้างส่วนใหญ่ของรถต้นแบบจะทำจากอลูมิเนียมเพื่อความเบาของตัวรถเสริมความแข็งแรงด้วยคานเหล็กและสามารถรองรับน้ำหนักของผู้ขับขี่ รวมไปถึงน้ำหนักของตัวรถด้วย โครงสร้างของรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ใช้โปรแกรม Sketch Up 8 และ Auto Cad 2012 เพื่อช่วยในการการออกแบบ โครงสร้างจริงทำได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้าง 3 มิติ แบบไอโซเมตริก
ของรถสองล้อต้นแบบ

ส่วนรูปที่ 2 แสดงรายละเอียดขนาดโครงสร้างในแบบ
ภาพถ่ายแต่ละด้านของรถสองล้อต้นแบบ ส่วนระบบ
การขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบทดเกียร์ขนาด
350 W 24 VDC สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 200 kg
มีอัตราทดเกียร์ 1:5 มีความเร็วสูงสุด 500 รอบ
ต่อนาที ในการเลือกขนาดมอเตอร์นี้ได้คำนึงถึงเพื่อให้
สอดคล้องกับน้ำหนักทั้งหมดตัวรถรวมทั้งน้ำหนัก
ของผู้ขับขี่ ส่วนอัตราทดเกียร์ช่วยในการเพิ่มแรง
ขับเคลื่อน ซึ่งมอเตอร์ถือได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก
ในการขับเคลื่อนและการทรงตัวของรถสองล้อควบคุม
การทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum



รูปที่ 2 ภาพฉาย 2 มิติของรถสองล้อต้นแบบที่เป็น
(ก)

ภาพด้านหน้า (ข) ภาพด้านข้าง (ค)

ภาพด้านบน และ (ง) ภาพด้านล่าง

2.2 การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ของรถสองล้อ
ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendu-
lum โปรแกรมถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม Protel
99 SE [7] ซึ่งในส่วนวงอิเล็กทรอนิกส์ของรถสองล้อ
ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendu-
lum แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนไมโครคอน
โทรเลอร์ (Microcontroller Board) ส่วนขับเคลื่อน
มอเตอร์ (Drive Motor Board) และส่วนเซนเซอร์
ความสมดุล (Balancing Sensor Board)

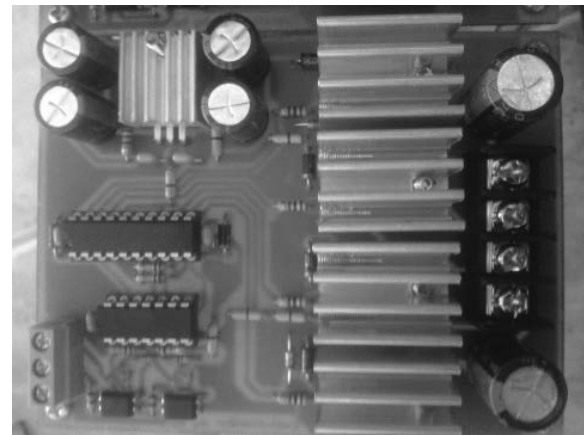
2.2.1 ส่วนไมโครคอนโทรเลอร์ (Micro- controller Board)

สำหรับวงจรควบคุมรถสองล้อควบคุม
การทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum
เป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สำคัญส่วนหนึ่งที่ใช้ควบคุม
การทำงานของรถสองล้อต้นแบบไม่ว่าจะเป็นการ
รับข้อมูลจากเซนเซอร์การทรงตัวด้วยระบบสมดุล
รวมถึงการให้ข้อมูลสัญญาณ เพื่อที่จะไปขับเคลื่อน
ให้รถเคลื่อนที่หรือทรงตัวได้ตามที่ต้องการ ซึ่งใช้บอร์ด
ไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino รุ่น Fino 328 ของ
บริษัท Micro Tech ซึ่งเป็นบอร์ดที่สามารถนำมา
พัฒนาได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับบอร์ด I/O พื้นฐาน
รวมทั้งพัฒนาการโต้ตอบแบบสแตนด์อโลนหรือ

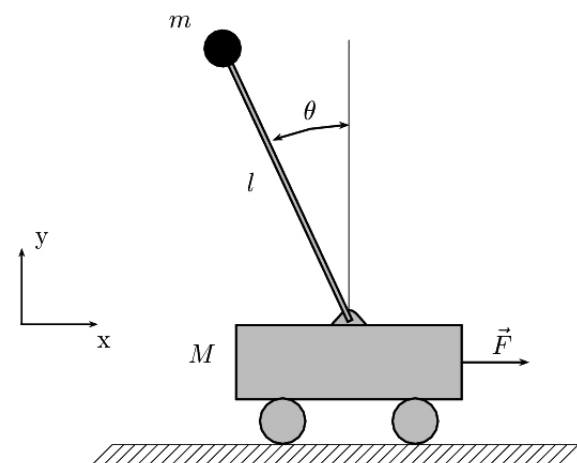
เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ได้ ใช้ไดรฟ์ FT232RL เป็นช่องทางอินเทอร์เฟซสัญญาณกับคอมพิวเตอร์

2.2.2 ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive Motor Board)

วงจรส่วนนี้เป็นส่วนที่ต้องออกแบบให้เหมาะสมเพื่อที่จะขับเคลื่อนให้พอกับความต้องการของมอเตอร์ 350 W ที่ใช้งานในการเคลื่อนที่รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ไอซีชนิด Full H-Bridge เบอร์ HIP4080AIPZ ของบริษัท Intersil [8] ที่สามารถกำหนดค่าการขับเคลื่อนได้ทั้งแบบ Inverting และ Non-Inverting นอกจากนี้ไอซี HIP4080AIPZ รุ่นนี้สามารถทำการเปรียบเทียบข้อมูลอย่างแม่นยำเพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการ Hysteresis ยิ่งไปกว่านั้นไอซี HIP4080AIPZ ไม่เพียงถูกใช้ในการขับมอเตอร์แปลงแรงไฟฟ้าขนาดกลางแต่ยังสามารถถูกนำมาใช้ในการผลักดันประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์แบบขั้นให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งรูปที่ 3 แสดงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ไอซี HIP4080AIPZ



รูปที่ 3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ไอซี HIP4080AIPZ



รูปที่ 4 Free Body Diagram of representation of mobile inverted pendulum [9]

2.2.3 ส่วนเซนเซอร์ความสมดุล (Balancing Sensor Board)

ส่วนนี้จะเริ่มต้นด้วยการอธิบายหลักการการรักษาสมดุลของรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ดังรูปที่ 4

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพื่อให้ก้าน Pendulum ที่มีลูกตุ้มอยู่ที่ปลายเพื่อความสามารถในการทรงตัวสามารถหมุนได้อย่างอิสระในระนาบเดียวโดยการเชื่อมต่อกับตัวรถที่จุดต่อหมุนได้ เมื่อก้าน Pendulum เกิดการเอียงหรือหมุนไปในทิศทางใดนั้นตัวรถก็จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้นในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อที่จะประคองก้าน Pendulum ไม่ให้เอียงมากเกินไปจนล้มและเพื่อรักษาสมดุลในการทรงตัวของรถ ซึ่ง

ระบบ Pendulum เป็นระบบที่มีจุดสมดุลอยู่รอบแกนหมุนด้วยกันสองจุดคือจุดที่ Pendulum ตั้งตรงในแนวดิ่งและจุดที่ Pendulum ห้อยตัวลงในแนวดิ่ง แต่จุดเสถียรภาพในกรณีไม่มีตัวควบคุมนั้นมีเพียงจุดเดียว คือ จุดที่แกนห้อยตัวลงในแนวดิ่งเท่านั้น การทำให้ Pendulum สามารถตั้งตรงในแนวดิ่งได้ขึ้นอยู่กับวิธีการใส่ตัวควบคุมที่เหมาะสมเข้าไปในระบบซึ่งมีอยู่หลายวิธี โดยตัวควบคุมดังกล่าวเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมในการใช้งาน

พิจารณาตามรูปที่ 4 จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inverted Pendulum โดยใช้สมการกลศาสตร์แบบลากรางจ์ (Lagrange's equations) [9] เพื่อช่วยต่อความเข้าใจทำการตั้งสมมติฐานว่าระบบเคลื่อนที่ในระนาบ XY เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยการตั้งสมมติฐานนี้จะไม่ทำให้สูญเสียความเป็นรูปทั่วไปของระบบการเคลื่อนที่สองมิติ โดยตัวแปรต่าง ๆ จะอ้างอิงจากรูปที่ 4 คือ $\theta(t)$ เป็นฟังก์ชันของมุมของก้าน Pendulum ทำกับแนวดิ่งฉากกับพื้นโลกที่แปรผันตามเวลา โดยที่ก้าน Pendulum มีความยาว l ที่มีแรง F จากภายนอกกระทำในทิศแกน X และมีแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำในแนวแกน Y ซึ่งกำหนดให้ $x(t)$ เป็นฟังก์ชันของระยะทางของรถในแนวแกน X ที่แปรผันตามเวลา จากสมการกลศาสตร์แบบลากรางจ์ของระบบ [9] จะได้

$$L = T - V \quad (1)$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์ของระบบ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ และ V คือ พลังงานศักย์ของระบบ เมื่อแทนค่าลงสมการที่ 1 จะได้

$$L = \frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 - mgl\cos\theta \quad (2)$$

โดย v_1 และ v_2 คือ ความเร็วของตัวรถและความเร็วที่จุดศูนย์กลางมวลของมวลบนก้าน Pendulum ซึ่งสามารถเขียน v_1 และ v_2 ในรูปของ x และ θ ได้ดังนี้

$$v_1^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \dot{x}^2 \quad (3)$$

$$v_2^2 = \left(\frac{d}{dt}(x - l\sin\theta)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}(x - l\cos\theta)\right)^2 \quad (4)$$

ทำการลดรูปสมการที่ 4 จะได้เป็น

$$v_2^2 = \dot{x}^2 - 2l\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2 \quad (5)$$

แทนสมการที่ 3 และ สมการที่ 5 ลงในสมการที่ 2 จะได้สมการลากรางจ์ใหม่เป็น

$$L = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - ml\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}l^2\dot{\theta}^2 - mgl\cos\theta \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

เมื่อแทนสมการที่ 6 ลงสมการที่ 7 และสมการที่ 8 จะได้

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta}\cos\theta + ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (9)$$

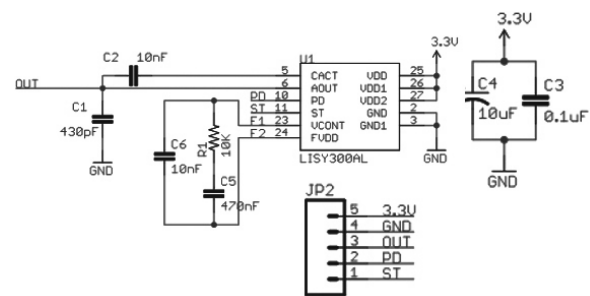
$$l\ddot{\theta} - g\sin\theta = \ddot{x}\cos\theta \quad (10)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งยากที่จะไปออกแบบตัวควบคุมในทางปฏิบัติผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมแปลงสมการไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้นก่อนโดยการสมมติว่าก้าน Pendulum แกว่งอยู่ในขนาดมุมที่เล็กมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและง่ายต่อการอธิบายพฤติกรรมของระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้การควบคุมการทรงตัวด้วยระบบสมมูลแบบ Inverted Pendulum จะใช้เซ็นเซอร์วัดความเอียงสองชนิดคือ Rate Gyroscope และ Accelerometer เป็นตัวควบคุมการทำงาน Inverted Pendulum

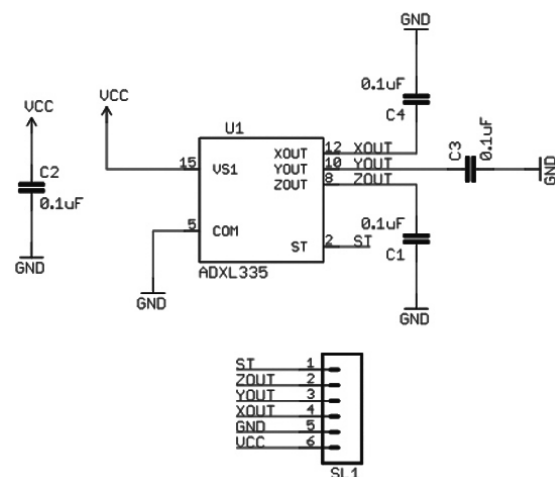
สำหรับ Rate Gyroscope เป็นอุปกรณ์แบบ Dynamic Sensing ที่สามารถตรวจจับความเอียงได้อย่างรวดเร็วเหมาะสำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่มีข้อเสียที่เรียกว่าค่าความผิดพลาด Drift หรือ การเลื่อนออกจากจุดเซตโดยรบกวนลือความคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum นี้ใช้ Rate Gyroscope รุ่น LISY300AL [10] โดยข้อมูลที่ออกจาก Rate Gyroscope อยู่ในรูปความเร็วเชิงมุมจำเป็นต้องแปลงเป็นความเอียงในรูปขององศา โดยการอินทิเกรตความเร็วเชิงมุม ซึ่งแรงสั่นสะเทือนจากโครงสร้างจะถูกปรับปรุงโดยวงจรขับที่อยู่ในวงจรป้อนกลับของสัญญาณป้อนกลับของสัญญาณตรวจจับจากนั้นกรองสัญญาณปรากฏเป็นสัญญาณอนาล็อกที่เอาต์พุต โดยการต่อพินของ Rate Gyroscope ถูกแสดงดังรูปที่ 5

ส่วนเซ็นเซอร์วัดความเอียงอีกตัวหนึ่งที่ถูกใช้เพื่อควบคุม Pendulum คือ Accelerometer เป็นอุปกรณ์วัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งต้องทำการแปลงเป็นมุมเอียงผ่านการใช้ฟังก์ชัน arcsin โดย Accelerometer มีข้อดี คือ สามารถบอกความเอียงได้อย่างแม่นยำเมื่อรออนิ่งเท่านั้น หรือ

เรียกว่าเป็นอุปกรณ์ Static Sensing ซึ่งต่างจาก Gyroscope ที่เป็นแบบ Dynamic Sensing แต่มีความไวในการตรวจจับที่ต่ำมากทำให้ได้เอาต์พุตที่มีความคลาดเคลื่อนได้เมื่อ Accelerometer ไม่อยู่นิ่งกับที่ ซึ่ง Accelerometer ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้คือรุ่น ADXL335 [11] ที่มีขนาดเล็ก บางและใช้พลังงานต่ำ มีแกนทั้งหมดสามแกน โดยสัญญาณเอาต์พุตของ Accelerometer ออกมาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าจำกัดจากรูปที่ 6 เป็นการต่อใช้งานของตัว Accelerometer โดยใช้ตัวเก็บประจุ C4 C3 และ C1 ต่อเข้ากับขา XOUT YOUT และ ZOUT ตามลำดับ โดยสามารถเลือกแบนด์วิดท์ให้เหมาะสมกับการใช้งานช่วง 0.5 Hz ถึง 1600 Hz สำหรับแกน X และ Y ส่วนแกน Z สามารถเลือกใช้ในช่วง 0.5 Hz – 550 Hz



รูปที่ 5 การต่อพินของ Rate Gyroscope



รูปที่ 6 การตั้งค่าและฟังก์ชันของขาแต่ละขาของ Accelerometer

2.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

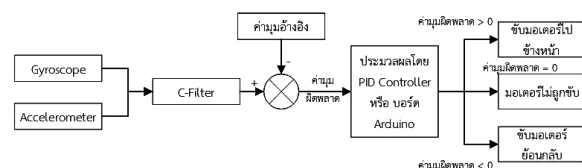
รูปที่ 7 แสดงระบบควบคุมรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เป็นระบบป้อนกลับแบบลบแบบ PID Control โดยค่าที่ป้อนกลับเป็นมุมองศาจากเซนเซอร์วัดความเอียง ซึ่งค่ามุมเอียงที่ป้อนกลับมาจะถูกลบออกจากค่ามุมอ้างอิง (Reference angle) ได้เอาท์พุทความผิดพลาดออกมาเป็นมุมผิดพลาด (Error angle) ป้อนเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลแล้วส่งออกไปยังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive motor) เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ตัวรถเกิดมุมผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อรถเอียงไปจากค่าเริ่มต้นมากขึ้นจะทำให้เกิดมุมผิดพลาดมากขึ้นเช่นกัน ระบบจะสมดุลได้ก็ต่อเมื่อมุมผิดพลาดเป็นศูนย์หรือมุมของตัวรถมีค่าเท่ากับมุมเริ่มต้นนั่นเอง โดยกระบวนการทำงานของบอร์ด Arduino จะมีขั้นตอนตามกระบวนการในรูปที่ 8 ระบบควบคุมจะรับค่ามุมมาจาก Gyroscope และ Accelerometer เป็นค่าควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ

3. ขั้นตอนการทดสอบและวัดผลการทำงาน

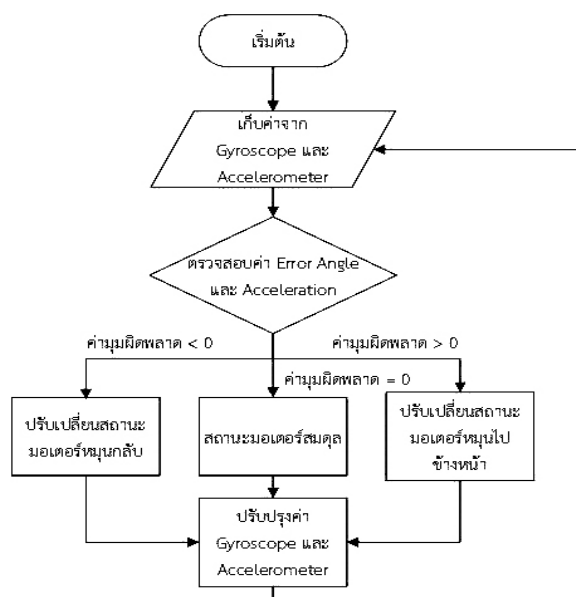
ส่วนนี้จะกล่าวถึงการวัดทดสอบพื้นฐานของสัญญาณเอาท์พุทของตัวตรวจจับความเอียงทั้ง Gyroscope และ Accelerometer รวมทั้งได้ทำการทดสอบทางปฏิบัติด้านความสามารถการรักษาสถิตของรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ในกรณีแรกเป็นกรณีที่ไม่มีแรงกระทำจากภายนอกและอีกกรณีหนึ่งคือเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก โดยส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนข้างต้นดังนี้

3.1 การทดสอบสัญญาณเอาท์พุทของ Gyroscope

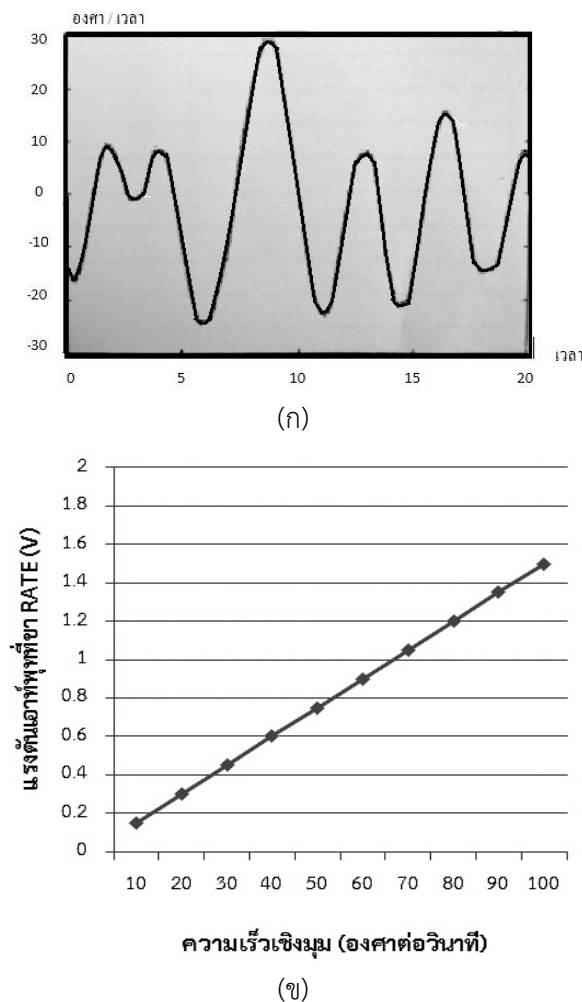
รูปที่ 9 (ก) แสดงผลตอบสนองทางเวลาของอัตราเร็วเชิงมุมของรถสองล้อ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปอัตราเร็วเชิงมุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง สัญญาณเอาท์พุทที่ขา RATE ของ Gyroscope จะได้ออกมาในรูปแบบแรงดัน จึงต้องแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วยบอร์ด Arduino Fino328 เพื่อนำไปประมวลผลข้อมูลจากรูปที่ 9 (ข) แสดงค่าแรงดันของสัญญาณเอาท์พุทเทียบกับความเร็วเชิงมุมเห็นได้ว่าความเร็วเชิงมุมกับค่าแรงดันเอาท์พุทของ Gyroscope จะแปรผันตรงในรูปแบบเชิงเส้น



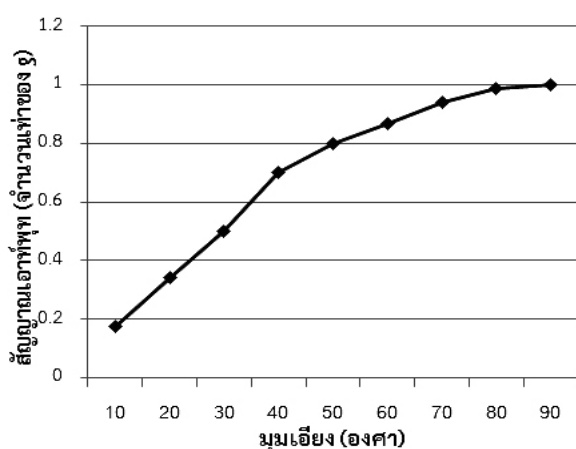
รูปที่ 7 ระบบควบคุมรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum



รูปที่ 8 กระบวนการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ



รูปที่ 9 ผลการวัด (ก) ผลตอบสนองอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของ Gyroscope



รูปที่ 10 สัญญาณเอาต์พุตที่ขา Xout หรือ Yout ของ Accelerometer เทียบกับมุมเอียงของรถ

3.2 การทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของ Accelerometer

Accelerometer จะถูกวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา Xout หรือ Yout ซึ่งข้อมูลออกมาจาก ADXL335 จะเป็นลักษณะ PWM อยู่ในรูปของจำนวนเท่าของค่า g (อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) โดยค่า g จะแปรผกผันไปตามความกว้างของ duty cycle จำเป็นต้องให้บอร์ด Arduino ทำการรับข้อมูลในโหมดดิจิตอลเพื่อส่งต่อการนำไปประมวลผลต่อไป ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการทดสอบถูกแสดงในรูปที่ 10 เปรียบเทียบกับค่ามุมเอียงที่เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าค่ามุมเอียงที่เพิ่มขึ้นกับค่าสัญญาณเอาต์พุตมีการแปรผันแบบไม่เป็นเชิงเส้น

3.3 การทดสอบความสามารถในการรักษาสมดุล

ในการทดสอบการรักษาสมดุลและการทรงตัวของรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เริ่มต้นรถสองล้อต้นแบบอยู่ในสภาวะการทรงตัวสมดุลซึ่งรถสองล้อต้นแบบจะตั้งตรงโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์สมดุลดังรูปที่ 11 (ก) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้รถสองล้อเกิดมุมเอียงขึ้นจะทำให้เซนเซอร์ส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมและสั่งการให้มอเตอร์ขับเคลื่อนให้รถกลับมาทรงตัวในสภาวะสมดุลอีกครั้ง ดังรูปที่ 11 (ข) และ 11 (ค) ตามลำดับ

4. สรุปผล

รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เป็นพาหนะส่วนบุคคลที่มีความไวและเสถียรภาพมากขึ้นซึ่งทำงานร่วมกับ Gyroscope และ Accelerometer ที่ใช้ตัวควบคุมการทำงานเป็นบอร์ด Arduino โดยผลการทดสอบ

สัญญาณเอาร์ทพุทของ RATE Gyroscope เปรียบเทียบกับความเร็วเชิงมุมจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงโดยมีความเป็นเชิงเส้น สำหรับสัญญาณเอาร์ทพุทของ Accelerometer จะแปรผันตรงแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับมุมเอียงของรถสองล้อที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการรักษาสสมดุลและการทรงตัวของรถสองล้อเป็นไปด้วยดีกล่าวคือเมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำรถสองล้อต้นแบบจะตั้งตรงโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์ แต่เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจนทำให้รถเอียงจากแนวสมดุลจนทำให้เซนเซอร์ส่งข้อมูลไปยังบอร์ดควบคุมไปสั่งการให้มอเตอร์ทำการหมุนเพื่อให้รถกลับเข้าสู่ตำแหน่งการทรงตัวที่สมดุลอีกครั้ง โดยรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum มีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปใช้ในการขนส่งส่วนบุคคลในยุคปัจจุบัน รวมทั้งราคาต่อหน่วยถูกกว่ารถสองล้อที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดอีกด้วย



(ค)

รูปที่ 11 การทดสอบสภาวะการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ (ก) สภาวะเริ่มต้น (ข) สภาวะมีแรงภายนอกกระทำและล้อทำการรักษาสสมดุล และ (ค) สภาวะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

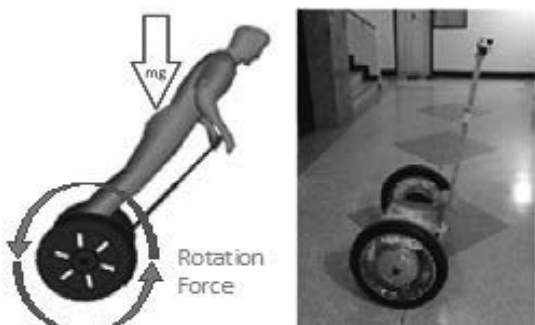
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Deka products limited partnership, "Personal mobility vehicles and methods," US Patent No. US620223 0B1, 2001.
- [2] Larson, T. (2005), "Balancing robot project - bender," Last accessed October 2005. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.tedlarson.com/robots/balancingbot.htm>
- [3] Blackwell, T. (2005), "How to build a self balancing scooter," Last accessed October 2005. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://tlb.org/scooter.html>



(ก)



(ข)

- [4] David P. Anderson, “nBot Revision 6,” Last accessed September 2013. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [5] Grasser, F., D’Arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A., “JOE: A Mobile, Inverted Pendulum”, Vol. 49, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002.
- [6] A.-J. Baerveldt and R. Klang , “A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter,” Intelligent Engineering Systems conference, Sept. 1997.
- [7] เอกชัย กองเงิน, “การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วย Protel 99 SE,” โรงเรียนแสงทอง อีเล็กทรอนิกส์, 2546.
- [8] Intersil, “IC HIP4080AIPZ datasheet,” Intersil Cooperation, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.verical.com/data-sheet/intersil-gate-and-power-driver-hip4080aipz-112229.pdf>
- [9] A. M. Bloch, D. E. Chang, N. E. Leonard, J. E. Marsden, “Controlled Lagrangians and the Stabilization of Mechanical Systems II: Potential Shaping,” IEEE TRANS. ON AUTO. CONTROL, VOL. 46, NO. 10, OCTOBER, 2001, 1556–1571
- [10] STMicroelectronics co.Ltd., Rate Gyroscope LISY300AL datasheet, 2008. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LISY300AL.pdf>
- [11] Analog Devices, Inc., Accelerometer ADXL 335 datasheet, 2009 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf>