

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการควบคุมแผ่นรักษาความสมดุล

Mathematical modeling for stabilized plate controlling

ทศพล ศรีสุ่มังคลังกูร^{1*}

Totsapon Srisumoungklounggoon^{1*}

บทคัดย่อ

แผ่นรักษาความสมดุลเป็นอุปกรณ์ที่คิดขึ้นเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ในงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่น อุปกรณ์ขนย้ายทั้งสิ่งที่เป็นเปราะบางและแตกหักง่าย หรือผู้ป่วยในโรงพยาบาลต้องการรักษาระดับให้คงที่อยู่เสมอ เพื่อป้องกันความเสียหายหรืออันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแผ่นรักษาความสมดุล โดยใช้ระบบควบคุมแบบกำลังสองเชิงเส้น (linear quadratic regulator: LQR) โดยเริ่มจากการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการใช้สมการลากรางจ์เข้ามาช่วยในการคำนวณ จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความสมดุล แล้วจึงทำการทดลองสร้างจริงโดยใช้โมดูลวัดความเร่งในการวัดมุมเอียงของแผ่นรักษาความสมดุล และใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ควบคุมระดับของแผ่นรักษาความสมดุลให้ได้ระนาบ โดยจากการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ควบคุมระบบที่ออกแบบไว้แล้วพบว่า ระยะเวลาการเข้าสู่แนวระนาบซึ่งเป็นสภาวะที่สมดุลของระบบใช้เวลาประมาณ 1 วินาที ในส่วนของผลการทดลองจริงพบว่า ระบบที่ควบคุมที่ออกแบบสามารถควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลให้รักษาความสมดุลให้ได้ระนาบได้เมื่อแผ่นรักษาความสมดุลมีการเอียงเกิดขึ้น ภายในระยะเวลาประมาณ 2 วินาที

คำสำคัญ: การควบคุมแบบกำลังสองเชิงเส้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แผ่นรักษาความสมดุล

Abstract

The stabilized plate is a device designed for various applications with high safety requiring, involving the movement of delicate and fragile items in hospital to keep patients position stable to prevent potential harm or danger. This research introduces the design of a stabilized plate control system using a Linear Quadratic Regulator (LQR) control scheme. The mathematical model was constructed using Lagrange's equation to aid in calculations. MATLAB/Simulink software was then used to create a motion model for the stabilized plate. Real-world experiments were conducted using an acceleration sensor to measure the tilt angle of the stabilized plate. MATLAB/Simulink was also employed to control the stabilized plate's position. Simulation results showed that the system took approximately 1 second to reach the equilibrium position, which was the balance state of the system. In real-world experiments, it was observed that the designed control system can maintain the balance of plate within approximately 2 seconds when the plate became tilted.

Keywords: linear quadratic regulator control, mathematical model, stabilized plate

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus

* Corresponding author. E-mail: totsapon.s@rmutsb.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันในการขนส่งวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักและขนาดที่ใหญ่ไม่มาก มักจะใช้เครื่องทุ่นแรงจำพวกรถเข็นต่าง ๆ ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในการขนส่ง ในกรณีที่เป็นวัสดุอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรง มีวัสดุรองรับหรืออยู่ในหีบห่อที่มีการกันกระแทกเป็นอย่างดีก็คงจะไม่มีปัญหาใด ๆ เกิดขึ้นหากจะต้องเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่มีความลาดเอียงหรือมีความขรุขระไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าวัดวัสดุอุปกรณ์นั้นไม่มีความแข็งแรง แดกเปราะหักง่าย ไม่สามารถรับการกระแทกได้จากการเคลื่อนที่ หรือในกรณีการนำส่งผู้ได้รับบาดเจ็บหรือผู้ป่วยจากสถานที่เกิดเหตุไปยังโรงพยาบาลหรือระหว่างโรงพยาบาลแห่งหนึ่งไปยังโรงพยาบาลอีกแห่งหนึ่ง ที่มักจะคำนึงถึงความรวดเร็ว ปลอดภัยของผู้ป่วยในการขนย้ายแต่ในระหว่างที่มีการขนย้ายผู้ที่ได้รับบาดเจ็บหรือผู้ป่วยส่งโรงพยาบาลนั้น อาจจะได้รับผลกระทบกระเทือนของร่างกายอันเนื่องมาจากสภาพถนนที่มีความเอียง หรือสภาพผิวการจราจรที่ขรุขระไม่ราบเรียบหรือการเคลื่อนย้ายผู้ป่วยภายในโรงพยาบาลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งก็ตาม และอาจกลายเป็นการเพิ่มอาการบาดเจ็บให้กับผู้ได้รับบาดเจ็บหรือผู้ป่วยดังกล่าวจนเกินจากอาการที่ได้รับจากอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ใด ๆ ที่ก่อให้เกิดการบาดเจ็บ จนทำให้การรักษาพยาบาลเป็นไปอย่างยากลำบากซับซ้อนยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบการควบคุมการรักษาความสมดุลของแผ่นเพลทในรถเข็นที่ใช้ขนส่งวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงเตียงขนย้ายผู้ป่วยให้ปรับสภาพอยู่ในแนวระนาบขนานกับพื้นโดยอัตโนมัติไม่ว่าสภาพของเส้นทางในการขนย้ายจะเป็นเช่นใด เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ที่มีค่าเกิดความเสียหาย

หรือผู้ได้รับบาดเจ็บ ผู้ป่วยได้รับความกระทบกระเทือน ในขณะที่เคลื่อนย้ายอันเนื่องมาจากสภาพเส้นทางที่ขรุขระ มีความลาดเอียงในด้านต่าง ๆ โดย Wellstead (2009) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam basic โดยวิธีการใช้วิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการมองชิ้นงานเข้าไปในแบบสองมิติเพื่อทำการหาแรงและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มากระทำกับชิ้นงาน และทำการทดลองทำแบบจำลองโดยใช้ตัวควบคุมในแบบต่าง ๆ มาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน เช่น ระบบควบคุมแบบคงทน (robust control) แบบพีไอดี (PID control) และแบบฟัซซี่ ลอจิก (fuzzy logic control) ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ในด้านการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Kheowree (2018) ได้ทำการศึกษาการควบคุมระดับความสูงของเครื่องบิน 4 ใบพัดบังคับวิทยุ โดยใช้ตัวสังเกตคาลมานในการประมาณค่าความสูงของเพดานบิน จากค่าที่ตรวจวัดได้ของตัวตรวจจู้วัดความดันร่วมกับตัวตรวจจู้วัดความเร่งซึ่งมีใช้ในการวิจัยนี้เช่นกัน และใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับแบบปรับตัวเองได้ในการควบคุมระดับความสูงของเพดานบิน ในงานวิจัยของ Evanko, Dorset, & Chu (2005) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball on beam system with an embadded control ซึ่งเป็นการทำวิจัยโดยใช้ตัวตรวจจู้แบบ GP2D12 interface distance sensor ซึ่งจะส่งสัญญาณออกมาในรูปแบบแรงดันทางไฟฟ้า (voltage) และทำการส่งสัญญาณต่อไปยังชุดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ MC9S12C32 ในการสร้างสัญญาณขาออกของระบบโดยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ในด้านของการใช้ตัวตรวจจู้เพื่อส่งสัญญาณในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าและการใช้

ระบบควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุม สำหรับงานวิจัยของ Wamjohi, & Cheever (2005) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam control theory demontstrater ซึ่งเป็น การควบคุมลูกบอลโดยการหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการมองชิ้นงานเข้าไปในแบบสองมิติ เพื่อทำการหาแรงและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มากระทำกับชิ้นงานและการเขียนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทำควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีในส่วนของ การเขียนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ สำหรับงานวิจัยของ Chanhom (2021) ได้ทำการวิจัยเรื่องการสร้างแบบจำลองและการจำลอง การทำงานของระบบเก็บพลังงานแบบใช้ฐานอุปกรณ์เก็บพลังงานหลายตัวโดยใช้การจัดการพลังงานด้าน บัสกระแสตรง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองรวมถึง จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ระบบเก็บพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่และตัวเก็บ ประจุยิ่งยวดเป็นกรณีศึกษา และจากผลการจำลอง การทำงานนั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถควบคุม การอัดและคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัว ได้ตามต้องการ ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีในส่วนของ การเขียน โปรแกรม MATLAB/Simulink ในขั้นตอนการจำลอง การทำงานของงานวิจัยนี้ ในส่วนงานวิจัยของ Ismael (2007) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam เป็นการหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และบ่งบอกถึงแนวคิด ในการมองโมเดลในรูปแบบสองมิติและแสดงวิธีการ เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชัน ถ่ายโอน (transfer function) และนำมาทำวิธี state space equation โดยกำหนดตำแหน่งจุดหมุนของคาน อยู่ที่ปลายสุดและรักษาสมดุลของคานให้ได้ตามแนว ระนาบ ซึ่งวิธีการหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้

เป็นแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยในนี้ จึงได้ใช้ศึกษาเพื่อ เป็นแนวคิดในการสร้างรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และงานวิจัยของ Hollis, Lawer, & Kantor (2006) ได้นำเสนอหุ่นยนต์ ballbot โดยเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อ บอลทรงกลมที่ใช้วัสดุทำเป็นเหล็กและเคลือบด้วย ยูรีเทน หนา 3.20 มิลลิเมตร โดยหุ่นยนต์นี้สามารถ เคลื่อนที่ไปบนพื้นระนาบโดยการหมุนของ โรลเลอร์ สเตนเลส จำนวน 2 อัน ที่ติดตั้ง ตั้งฉากกันและใช้วิธี ในการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ ที่เคลื่อนที่ไปบนพื้นระนาบ โดยใช้วิธีของลากรางจ์ (Lagrange method) และออกแบบระบบควบคุมแบบ กำลังสองเชิงเส้น (linear quadratic regulator: LQR)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุม เพื่อการควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลให้ทรงตัวได้ ตามแนวระนาบขนานกับพื้นโลกเมื่อเกิดการเอียง ของแผ่นรักษาความสมดุลขึ้น โดยเริ่มจากการจำลอง การทำงานโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำลังสองเชิงเส้น ที่เป็นตัวควบคุมแบบสมัยใหม่ที่มีอัตราขยาย (gain) คงที่พร้อมทั้งทำการประมาณระบบเป็นเส้นตรง (linearization of dynamic systems) และทำการ ทดลองควบคุมจริงเมื่อสร้างชุดแผ่นรักษาความ สมดุลตัวอย่างขึ้นมา และหากได้ผลการทดลองที่ดี ก็สามารที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริงเพื่อใช้ งานจริงต่อไปได้

วิธีการศึกษา

สำหรับวิธีการศึกษาการควบคุมระบบแผ่นรักษา ความสมดุลเข้าสู่ระนาบการใช้ตัวควบคุมแบบแบบ กำลังสองเชิงเส้น (linear quadratic regulator: LQR) ร่วมกับการประมาณระบบเป็นเส้นตรง (linearization

of dynamics systems) นั้นสามารถอธิบายได้โดยแบ่งขั้นตอนในการดำเนินการได้ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมของระบบควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลให้ทรงตัวได้ตามแนวระนาบเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

โดยให้ทรงตัวได้ตามแนวระนาบขนานกับพื้นที่ใช้ในการทดลองนั้น ได้มีการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบตามแนวระนาบขนานกับพื้นโลกขึ้นมา เพื่อใช้ในการกำหนดพิกัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบ ดัง (Figure 1)

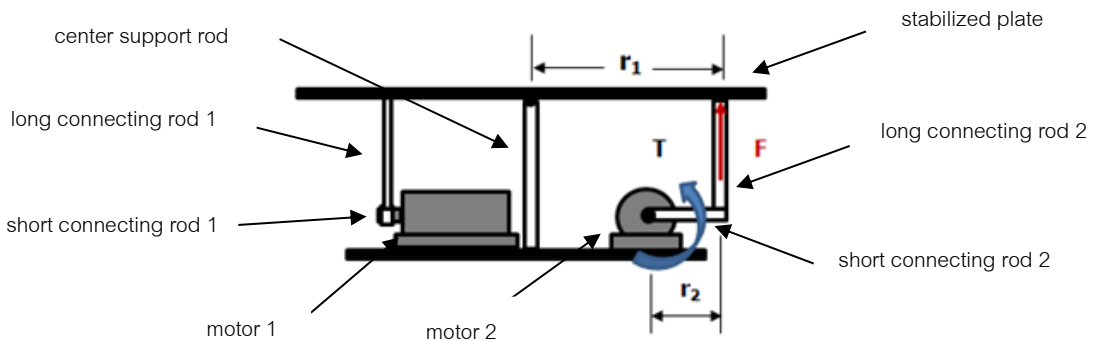


Figure 1 The structure of the stabilized plate.

โดยในการพิจารณาแผ่นรักษาความสมดุล ดัง (Figure 1) นั้น ได้ทำการพิจารณาเป็นแบบสองมิติ และจะทำการพิจารณาสองครั้ง คือ พิจารณาแผ่นรักษาความสมดุลในด้านระนาบ XZ และแผ่นรักษาความสมดุลในระนาบ YZ ซึ่งจากการแยกอย่างอิสระของการเคลื่อนที่นั้น ทำให้สามารถที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพียงระนาบเดียวเท่านั้น เนื่องจากอีกระนาบหนึ่งก็มีลักษณะเดียวกัน ซึ่งก็จะได้สมการในแบบเดียวกัน โดยที่จะพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความสมดุลดังต่อไปนี้

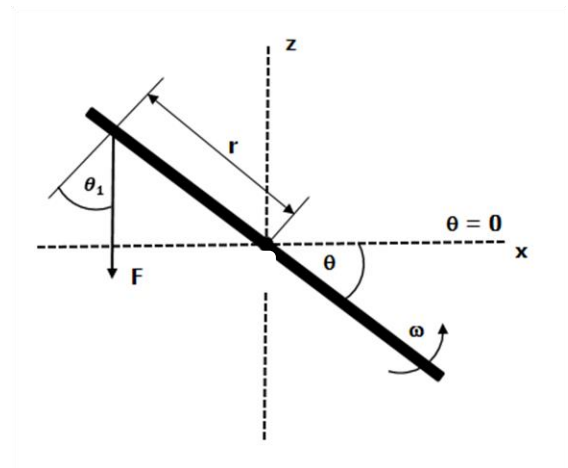


Figure 2 The view of 2D stabilized plate.

ซึ่งจากการพิจารณา (Figure 2) นั้นจะพบว่า มีการเคลื่อนที่เชิงมุมแบบหมุนเท่านั้น จะไม่มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนในขณะที่มีการเคลื่อนที่

2. ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแผ่นรักษาความสมดุล โดยการใช้สมการลากรางจ์ที่มีความเหมาะสมมากสำหรับระบบที่มีความซับซ้อน และช่วยให้การหาแบบจำลองเป็นไปได้ อย่างสะดวกมากขึ้น (Sangveraphunsiri, 2005) โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นรักษาความสมดุล โดยการใช้สมการลากรางจ์นั้น เริ่มต้นจะกำหนดให้ $\theta = 0$ องศา เมื่อ $t = 0$ วินาที ซึ่งสมการลากรางจ์มีรูปดังสมการ (1)

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

เมื่อ

$$L = T - U \quad (2)$$

โดยที่ L = สมการลากรางจ์ (Lagrangian)

T = พลังงานจลน์รวมของระบบ (total kinetic energy of the system)

U = พลังงานศักย์รวมของระบบ (total potential energy of the system)

q = ตัวแปรพิกัดทั่วไป (generalized coordinate system)

Q_i = แรงในระบบพิกัดที่สนใจ (generalized force)

l = อันดับของระบบ (system order)

จากสมการ (1 และ 2) เมื่อพิจารณหาพลังงานจลน์รวม (T) จากการรวมกันของพลังงานจลน์จาก

การเลื่อน (T_1) กับพลังงานจลน์จากการหมุน (T_2) และพลังงานศักย์ (U) ของระบบแผ่นรักษาความสมดุล แต่เนื่องจากระบบแผ่นรักษาความสมดุล มีเฉพาะการเคลื่อนที่แบบหมุนของแผ่นรักษาความสมดุลเท่านั้น นั่นคือ ไม่มีพลังงานจลน์จากการหมุน (T_2) และพลังงานศักย์ (U) ดังนั้นพลังงานจลน์รวม (T) จึงได้จากพลังงานจลน์จากการหมุน (T_2) เท่านั้น ดังสมการ (3)

$$L = T \quad (3)$$

โดยสูตรหาค่าพลังงานจลน์จากการหมุน ซึ่งเป็นพลังงานจลน์รวม (T) เป็นไปดังสมการ (4)

$$T = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (4)$$

โดยที่ J = ค่าความเฉื่อย หรือ inertia ของแผ่นรักษาความสมดุล

จากนั้นแทนค่าสมการ (4) ลงในสมการ (3) จะได้ตัวแปรลากรางจ์ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (5)$$

จากสมการ (1) เมื่อกำหนดให้ $q_i = \theta$ และ $Q_i = \tau$ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (6)$$

จากนั้นนำค่าที่คำนวณจากการแทนสมการ (5) ลงในไปสมการ (6) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบแผ่นรักษาความสมดุล ดังสมการ (7)

$$J\ddot{\theta} = \tau \quad (7)$$

โดยเมื่อพิจารณาจาก (Figure 1) โดยเริ่มจากระนาบ XZ แล้วจะพบว่าค่าแรงบิด τ มีค่าเท่ากับ Fr_1 เมื่อ r_1 เป็นค้ำรัศมีจากจุดหมุนถึงแนวแรงที่มากระทำแผ่นรักษาความสมดุล เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ (7) จะได้

$$J\ddot{\theta} = Fr_1 \quad (8)$$

จากนั้นจัดรูปสมการ (8) ใหม่จะได้เป็นสมการ (9)

$$\ddot{\theta} = \frac{r_1}{J} F \quad (9)$$

และจากสมการ (9) ซึ่งเป็นสมการในการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความสมดุลที่พิจารณาเฉพาะแกน X ในทำนองเดียวกัน เมื่อต้องการหาค่าทางแกน Y ก็จะใช้สมการเดียวกันได้แต่จะเปลี่ยนการพิจารณาจากมุม θ ไปเป็นมุม φ แทน ซึ่งก็จะได้สมการการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความสมดุลในลักษณะเดียวกัน ดังสมการ (10)

$$\ddot{\varphi} = \frac{r_1}{J} F \quad (10)$$

แต่สมการด้านบนนั้นยังไม่รวมเอามอเตอร์เข้าไปด้วย ดังนั้น จึงพิจารณารวมมอเตอร์เข้าไปด้วย โดยพิจารณาจากสมการที่แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยเมื่อพิจารณาที่แรงบิด τ ในสมการ (7) จะได้ออกมาดังสมการ (11)

$$\tau = K_t i_m \quad (11)$$

โดยที่ K_t = torque constant (N.m / amp)
 i_m = กระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ (amp)

แต่เมื่อพิจารณาจาก (Figure 1) แล้วนั้นพบว่า $\tau = Fr_2$ ด้วย ดังนั้นเมื่อจัดรูปใหม่จะได้ ดังสมการ (12)

$$F = \frac{\tau}{r_2} \quad (12)$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (12) กลับลงไปในสมการ (8) จะได้ดังสมการ (13)

$$J\ddot{\theta} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \tau \quad (13)$$

ย้อนไปพิจารณาจากสมการ (11) เมื่อ i_m คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในมอเตอร์ โดยสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่แรงดันไฟฟ้า (voltage: V) ที่ตกคร่อมวงจรรออาร์เมเจอร์ (armature circuit) นั้นสามารถนำมาเขียนได้ตามสมการดังนี้ คือ

$V - K_e\omega = i_m R + L \frac{di_m}{dt}$ จากนั้นทำการคำนวณหาค่า i_m จากสมการ $V - K_e\omega = i_m R + L \frac{di_m}{dt}$ แต่เนื่องจากใน specification ของมอเตอร์จะพบว่าค่า L จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงคิดว่าค่าที่มีนั้นเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเทอม L จึงหายไป และเมื่อค่า K_e คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคงตัว (back EMF constant) ดังนั้นจะได้สมการที่เหลือเป็นดังสมการ (14)

$$i_m R + K_e\omega = V \quad (14)$$

เมื่อให้สัญลักษณ์ $\dot{\theta} = \omega$ เมื่อนำมาจัดรูปสมการใหม่จะได้เป็นดังสมการ (15)

$$i_m = \frac{V - K_e\omega}{R} \quad (15)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

และค่า V จะเป็นตัวแปรขาเข้าของระบบ แผ่นรักษาความสมดุล ในส่วนค่า ω คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ที่ได้กำหนดสัญลักษณ์ใหม่เป็น $\dot{\theta}_m$ จากนั้นจึงนำสมการ (15) แทนลงในสมการ (11) จะได้สมการ (16)

$$\tau = K_t \left(\frac{V - K_e\dot{\theta}_m}{R} \right) \quad (16)$$

และเมื่อนำสมการ (16) มาจัดรูปโดยแยกออกมาเป็นสองเทอมจะได้ดังสมการ (17)

$$\tau = \left(\frac{K_t V}{R} \right) - \left(\frac{K_t K_e \dot{\theta}_m}{R} \right) \quad (17)$$

จากนั้นกำหนดให้ $\alpha = \frac{K_t}{R}$, $\beta = \frac{K_t K_e}{R}$ และ $\dot{\theta}_m = \frac{r_1}{r_2} \dot{\theta}$ ก็จะได้สมการ (17) ใหม่ ดังสมการ (18)

$$\tau = \alpha V - \frac{r_1}{r_2} \beta \dot{\theta} \quad (18)$$

จากนั้นนำสมการ (18) แทนค่ากลับลงในสมการ (13) จะทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความสมดุลที่เป็นสมการเชิงเส้นโดยปริยาย เพราะไม่มีมูมมาเกี่ยวข้องอยู่ในสมการ รวมทั้งยังไม่ต้องการแปลงจากสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปเป็นสมการเชิงเส้นโดยประมาณอีกด้วย ดังสมการ (19)

$$J\ddot{\theta} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \alpha V - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \beta \dot{\theta} \quad (19)$$

จากนั้นทำการจัดรูปสมการ (19) ใหม่จะได้ดังสมการ (20)

$$J\ddot{\theta} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \beta \dot{\theta} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \alpha V \quad (20)$$

และทำการจัดรูปสมการ (20) ใหม่อีกครั้งจะได้ดังสมการ (21)

$$\ddot{\theta} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{\beta}{J} \dot{\theta} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \frac{\alpha}{J} V \quad (21)$$

เมื่อกำหนดให้ $\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{\beta}{J} = a_1$ และ $\left(\frac{r_1}{r_2} \right) \frac{\alpha}{J} = b_2$ ดังนั้นจากสมการ (21) จะได้ดังสมการ (22)

$$\ddot{\theta} + a_1 \dot{\theta} = b_1 V \quad (22)$$

ทำการจัดรูปสมการ (22) ใหม่จะได้ดังสมการ (23)

$$\ddot{\theta} = -a_1 \dot{\theta} + b_1 V \quad (23)$$

3. จัดสมการที่ได้ให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะ (state space model) ในรูปสมการสถานะ (state equation) ซึ่งเป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของระบบ โดยจากการจัดให้อยู่ในรูปปริภูมิสถานะ ในรูปสมการสถานะ นั้นคือ ตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของระบบที่เขียนในรูปของเวกเตอร์ของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเพื่อใช้เป็นตัวแทนของระบบในการออกแบบตัวควบคุมตามเมื่อ

x คือ เวกเตอร์สถานะของระบบซึ่งมีมิติ

เท่ากับค่าอันดับของระบบ

u คือ ตัวแปรอินพุต

y คือ ตัวแปรเอาต์พุต

โดยจากระบบ $x = [\theta \ \dot{\theta}]^T$, $y = [\theta]$ และ $u = [V]$ โดยเมื่อพิจารณาจากสมการ (23) ด้วยตัวปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ลงไปในสมการสถานะ เมื่อแทนค่าด้วยค่าตัวแปรทางกายภาพที่ใช้หาค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ M คือ มวลของแผ่นรักษาความสมดุลมีค่าเท่ากับ 0.43 kg, R_w คือ ระยะระหว่างแกนกลางกับจุดยึดชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีค่า 0.12 m, r_1 คือ รัศมีระหว่างแกนกลางกับจุดยึดชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีค่า 0.12 m, r_2 คือ รัศมีของแขนต่อมอเตอร์ มีค่า 0.055 m, R_m คือ ค่าความต้านทานของ

มอเตอร์กระแสตรง มีค่า 11.20 Ω และ K_e คือ ค่าคงที่ back EMF ของมอเตอร์กระแสตรง มีค่า 0.097 V.s/rad จะได้สมการสถานะออกมาเป็น

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ 0 & -0.8508 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 4.8240 \end{bmatrix} [V]$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + [0][V]$$

4. ออกแบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ LQR ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบสมัยใหม่อีกแบบ ซึ่งตัวควบคุมแบบ LQR มีการหาค่าอัตราขยาย (gain) คงที่ สามารถใช้หาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมโดยวิธี trial and error เพื่อใช้ในการควบคุม โดยเมื่อพิจารณาจากรูปสมการที่สถานะ จะได้ค่าออกมาสำหรับใช้ในการออกแบบโดยใช้ระบบควบคุมแบบ LQR ที่ได้กำหนดค่าเมตริกซ์ของสถานะ Q และสัญญาณเข้า R ที่ตกลงใจใช้สำหรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมโดยวิธี trial and error คือ $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ และ $R = 1$ ซึ่งค่าอัตราขยายที่ได้ออกมานั้น คือ [10.0000 2.0989]

5. จากนั้นจำลองการทำงานของระบบแผ่นรักษาความสมดุลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อควบคุมการทำงาน โดยในการจำลองการทำงาน จะดำเนินการโดยใช้ตัวควบคุมแบบ LQR ในการจำลองการทำงานเป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยนำสมการสถานะมาแปลงให้อยู่ในรูปไอคอนเครื่องมือ (toolbox) ในส่วนของ Simulink โดยกำหนดมุมที่ต้องการทดลองไว้ในไอคอนเครื่องมือที่ชื่อว่า state - space ดัง (Figure 3) ซึ่งระบบควบคุมที่ใช้ นั้น วิธีนี้สามารถคำนวณหาค่าอัตราขยายย้อนกลับ (feedback gain, K) ได้โดย

การกำหนดค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุน J โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการปรับแต่งค่าเมตริกซ์น้ำหนักสถานะ Q และสัญญาณขาเข้า R

โดยจะต้องตัดสินใจเลือกค่าอัตราขยายที่เหมาะสม โดยวิธีลองผิดลองถูก (trial and error) แล้วใส่ลงในไฟล์ m file

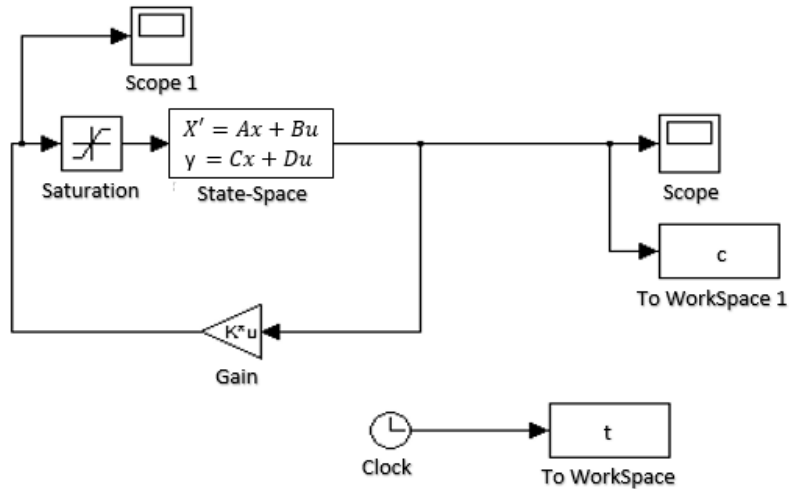


Figure 3 MATLAB diagram of mathematical model of stabilized plate.

เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราขยายป้อนกลับในโปรแกรมต่อไป จากนั้นพิมพ์ข้อมูลค่าของตัวแปรต่าง ๆ และสูตรย่อยที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตัวแปรในเบื้องต้นและค่าเมตริกซ์ต่าง ๆ ลงในโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งค่าที่คำนวณได้นั้นแสดงถึงผลลัพธ์จากการคำนวณของโปรแกรม MATLAB/Simulink และเมื่อได้ทำการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้ค่าอัตราขยายและค่าต่าง ๆ ในสมการซึ่งเป็นผลมาจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้นจริง ซึ่งจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ตามขั้นตอนนั้นจะได้ผลลัพธ์จากการคำนวณของโปรแกรมออกมา โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าของมุม และค่าผลตอบสนองของชุดแผ่นรักษาความสมดุล ซึ่งผลที่ได้นั้นแสดง

ในส่วนของผลการทดลองครั้งนี้คือ แสดงผลในรูปแบบของกราฟเป็นมุมของแผ่นรักษาความสมดุล (angle) กับเวลา (time) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศา (degree) กับวินาที (sec) โดยในการจำลองการทำงานของแผ่นรักษาความสมดุลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยได้กำหนดค่า initial condition คือ $[\theta \ \dot{\theta}]^T = [0 \ 0.35]^T$ ซึ่งผลการทดลอง ดัง (Figure 6)

6. ศึกษารายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดแผ่นรักษาความสมดุลและจัดสร้างชุดตัวอย่างแผ่นรักษาความสมดุล จากนั้นดำเนินการจัดสร้างชุดตัวอย่างแผ่นรักษาความสมดุลขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองควบคุมการทำงานจริงจากระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ โดยระบบส่งสัญญาณควบคุมระบบของแผ่นรักษาความสมดุลนั้น เริ่มต้นจากตัวตรวจรู้ความเร่ง

โดยเลือกใช้ตัววัดความเร่งแบบ ET – MMA7331 ซึ่งทำหน้าที่อ่านค่าความลาดเอียงของมุมมองแล้วส่งข้อมูลออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ได้รับค่าสัญญาณจากเอาต์พุตภายนอก (มุมที่เปลี่ยนแปลงไป) จากนั้นตัวตรวจจู้ความเร่งจะส่งสัญญาณแอนะล็อก (analog) ไปยัง DAQ card ซึ่งเป็นแบบการ์ด DAQ NI PCI – 6221 ที่ผลิตโดยบริษัท National Instruments ซึ่งทำหน้าที่เก็บและแปลงสัญญาณทั้งแอนะล็อก (I/O) และดิจิทัล (I/O) โดยมีการแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นแอนะล็อก หรือแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล โดยเก็บข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าและตัวตรวจจู้ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อนำไปประมวลผล โปรแกรม MATLAB/Simulink

แล้วส่งสัญญาณกลับมายัง DAQ card เพื่อทำการส่งสัญญาณไปยังชุดมอเตอร์ไดรฟ์ที่ได้เลือกใช้รุ่น ASP – 090 – 09 ที่ผลิตโดยบริษัท Copley Controls Corporation ที่มีค่า peak current 9(6.4) Adc(Arms) และค่า peak output power 0.79 kW ที่ทำหน้าที่ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ที่ได้เลือกใช้รุ่น UGFMED – B5L20E ซึ่งผลิตโดยบริษัท Yasakawa Electric Corporation ที่มีค่า rate speed 2000 rpm, ค่า max speed 4000 rpm, ค่า rate torque 0.083 N.m, ค่า inertia (without brake) 0.00077 kg/cm² และค่า output power 0.174 kW ให้หมุนเพื่อให้ได้มุมตามที่ต้องการ ซึ่งอยู่ในชุดตัวอย่างแผ่นรักษาความสมดุลที่ใช้ในการทดลองจริง ดัง (Figure 4)

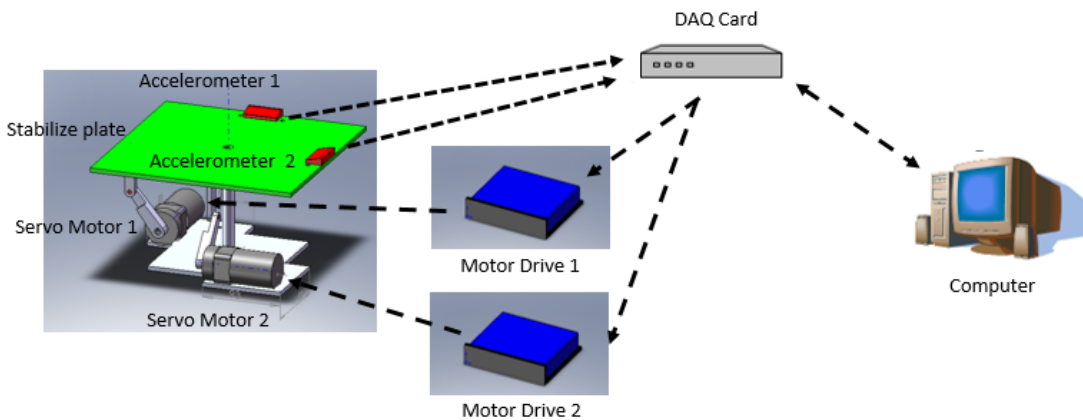


Figure 4 Experiment diagram of the stabilized plate.

7. นำการควบคุมที่หาได้จากขั้นตอนข้างต้นมาเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมชุดตัวอย่างแผ่นรักษาความสมดุลที่ได้สร้างขึ้นมาทดสอบ โดยสำหรับการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในส่วนงานจริงจะใช้

โปรแกรม MATLAB ที่เรียกว่า real-time window target ในการสร้าง analog input และ analog output เพื่อทำให้ตัวโปรแกรมส่งสัญญาณกับ DAQ card ได้ โดยในส่วนของอินพุตนั้นจะทำการเก็บค่าของตัววัดความเร่งที่มี

ความต่างขององศาที่ทดลอง แล้วนำไปแปลงเป็นค่าของตัววัดความเร่งของแกน X และแกน Y ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ต่อไป ซึ่งในการทดลองจะนำค่าของระบบที่กล่าวมาแล้วในส่วนของการจำลองการเคลื่อนที่ มาปรับแต่งและใช้ในการควบคุม โดยตัวควบคุมแบบ

LQR เป็นการนำ tool box ของ LQR มาใส่ไว้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนควบคุม โดยรับค่าสัญญาณป้อนกลับมาจากสมการของตัววัดความเร่งและส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปยัง DAQ card เพื่อส่งสัญญาณไปควบคุมการหมุนของมอเตอร์ต่อไปดัง (Figure 5)

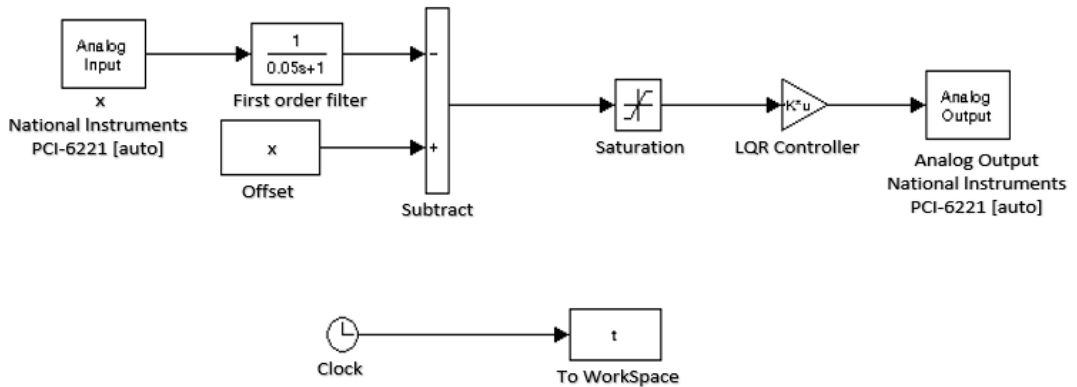


Figure 5 MATLAB diagram of LQR controller of the stabilized plate.

สำหรับการทดลองการทำงานจริงของระบบควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลนั้น จะทำการปรับตั้งค่าความสมดุลโดยใช้ฐานรองรับของแผ่นรักษาความสมดุลก่อนเพื่อปรับตั้งค่าของตัวตรวจจับความเร่งให้ได้ค่าอ้างอิงที่ระนาบศูนย์ โดยเมื่อทำการปรับตั้งค่าอ้างอิงที่ระนาบที่แผ่นรักษาความสมดุลมีระนาบเป็นศูนย์หรือมีค่ามุมเท่ากับศูนย์แล้ว จะทำการเอียงแผ่นรักษาความสมดุลให้เอียงไปตามมุมที่ 20 องศา และ -20 องศา โดยที่เลือกใช้มุมนี้ในการทดลองเนื่องจากเป็นมุมเอียงของจุดเชื่อมต่อพื้นอาคารที่มีความต่างระดับกันที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป โดยถ้าเป็นในโรงพยาบาลนั้นใช้ในการเคลื่อนย้ายผู้ป่วยวัสดุอุปกรณ์ภายในโรงพยาบาล สำหรับในการทำงานนั้น จะควบคุมให้แผ่นรักษาความสมดุลเอียงกลับมาจาก

ตำแหน่งมุมเท่ากับ 0 องศา อาศัยการส่งผ่านข้อมูลจากตัวตรวจจับความเร่งส่งผ่าน DAQ card ไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมในคอมพิวเตอร์และส่งผ่านออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ทำงานไปหมุนขับเคลื่อนต่อไปให้แผ่นรักษาความสมดุล โดยการหมุนของมอเตอร์นั้นจะถูกตรวจจับตำแหน่งการหมุนโดยเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อตรวจสอบว่าหมุนไปตามตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่และส่งข้อมูลกลับไปประมวลผลต่อไป

สำหรับสถานที่ที่ใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูลนั้น ได้มีการดำเนินการที่อาคารวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี เลขที่ 217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

ผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาจาก (Figure 6) แสดงผลการจำลองการทำงานตามขั้นตอนที่ 5 ระหว่างมุมของแผ่นรักษาความสมดุล (plate angle) ในแนวแกนตั้งกับเวลา (time) ในแนวแกนนอนของแผ่นรักษาความ

สมดุลที่เริ่มการทดลองที่ 20 องศา และ -20 องศาของระนาบ XZ โดยสำหรับกราฟแสดงผลของระนาบ YZ นั้นก็จะมีลักษณะเดียวกันกับกราฟในระนาบ XZ ซึ่งในกราฟของระนาบ XZ นั้นจะเห็นได้ว่า

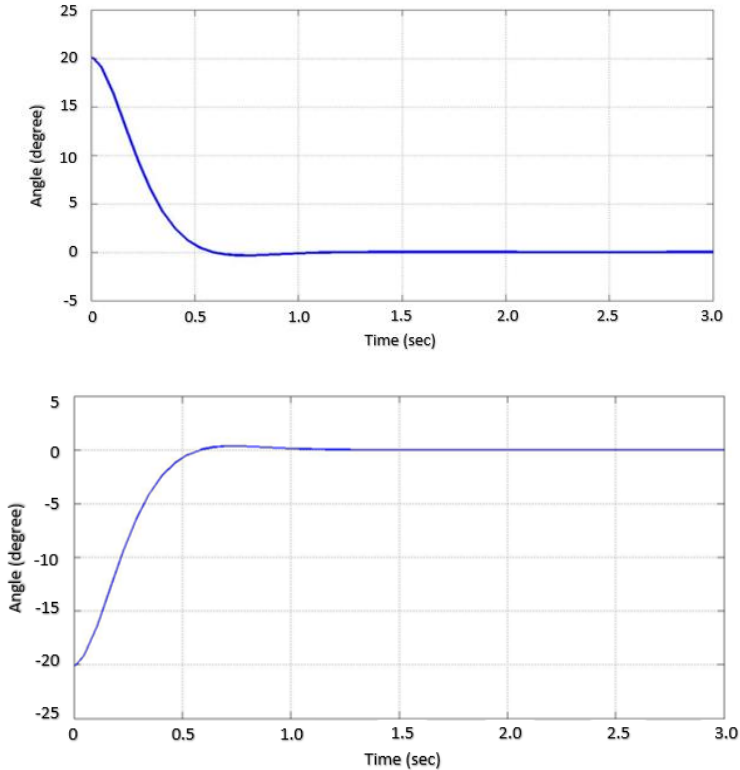


Figure 6 The angles value of XZ plane of the stabilized plate from simulation at 20 and -20 degree.

โดยมุมของแผ่นรักษาความสมดุลจะมีการหมุนเคลื่อนที่ทันที ที่เริ่มการจำลองการทำงาน เนื่องจากมุมของตัวแผ่นรักษาความสมดุลนั้น ไม่ได้ถูกกำหนดค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0 องศา (0 เรเดียน) หรือสภาวะสมดุลตั้งแต่ต้นแต่ถูกกำหนดมุมของแผ่นรักษาความสมดุลไว้ที่ 20 องศา (0.35 เรเดียน) และที่

-20 องศา (-0.35 เรเดียน) ซึ่งจากทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวกระตุ้นให้ชุดควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลเริ่มการทำงานทันทีโดยควบคุมการบ่อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่มอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์หมุนขับเคลื่อนต่อ (link) ให้หมุนเพื่อให้แผ่นรักษาความสมดุลเคลื่อนที่เพื่อที่จะรักษาสมดุลของแผ่นรักษาความสมดุล ในส่วนของมุมของ

แผ่นรักษาความสมดุลนั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าแผ่นรักษาความสมดุลจะเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบหรือที่มุมเท่ากับ 0 องศา โดยใช้เวลาประมาณ 1 วินาที ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุลทั้งสองมุม ซึ่งแสดงถึงความ

เป็นไปได้ในการใช้ระบบควบคุมที่ออกแบบควบคุมการทำงานและผลตอบสนองของระบบ

โดยผลการทดลองการทำงานจริงของระบบควบคุมตามขั้นตอนที่ 7 จะได้กราฟ ดัง (Figure 7)

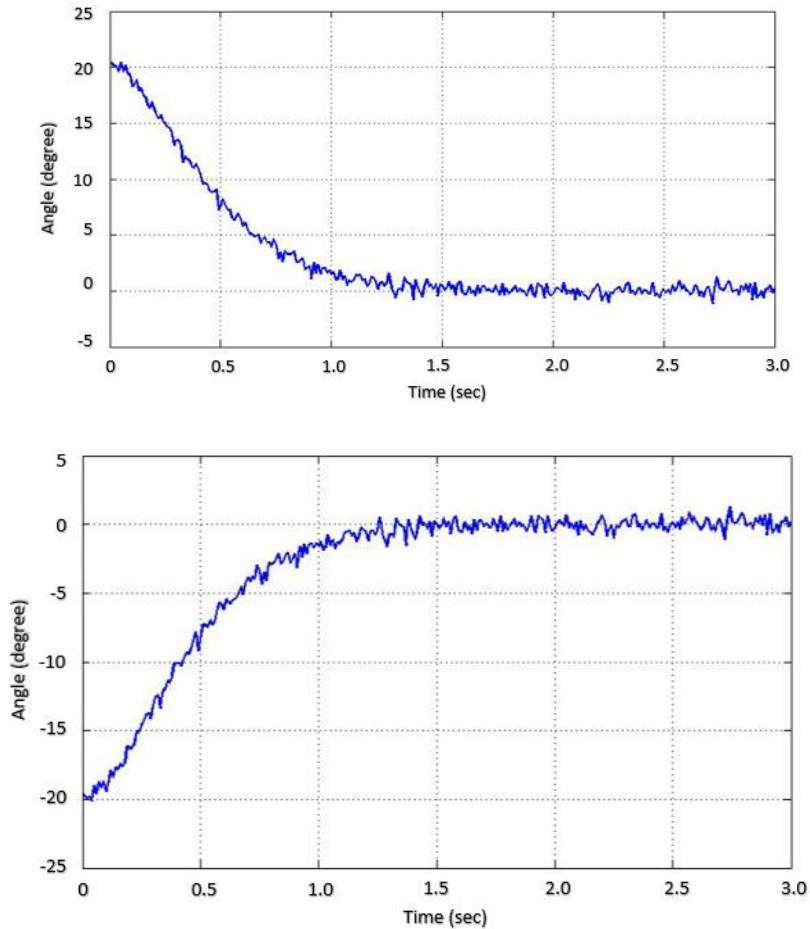


Figure 7 The angle values of XZ plane of the stabilized plate from actual experiment at 20 and -20 degree.

เมื่อพิจารณากราฟจาก (Figure 7) ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลการทำงานจริงระหว่างมุมของแผ่นรักษาความสมดุล (angle) กับเวลา (time) จะเห็นได้ว่ามุมของแผ่นรักษาความสมดุลจะมีการแกว่งไปมาขึ้นลง

อยู่ในช่วงประมาณ ± 1 องศา โดยมุมของแผ่นรักษาความสมดุลจะค่อย ๆ เข้าสู่ค่า 0 องศา เพื่อที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุลในแนวระนาบ โดยเวลา settling time ประมาณ 2 วินาที ซึ่งช้ากว่าผลที่ได้จากการจำลองการ

ทำงานที่มีค่า 1 วินาที อยู่ประมาณ 1 วินาที จากค่าเริ่มต้นของกราฟในการทดลองจริงที่กำหนดให้มีการเอียงของแผ่นรักษาความสมดุลอยู่ที่มุม 20 องศา และมุม -20 องศา ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการจำลองการทำงานของระบบกับการควบคุมการทำงานของระบบจริง

อภิปรายผล

จากผลที่ได้จากการควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถรักษาความสมดุลของระบบได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการรักษาความสมดุลที่มีความคล้ายคลึงในแง่ของการรักษาความสมดุลของระบบต่าง ๆ โดยงานวิจัยของ Wellstead (2009) ที่ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam basic ที่เป็นการควบคุมความสมดุลของลูกบอลบนคาน โดยใช้วิธีการหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยการมองชิ้นงานเข้าไปในแบบสองมิติเพื่อทำการหาแรงและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มากระทำกับชิ้นงาน และมีการใช้ตัวควบคุมในแบบต่าง ๆ มาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้ หรือในงานวิจัยของ Wamjohi, & Cheever (2005) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam control theory demontstrater ซึ่งเป็นการควบคุมลูกบอลบนคานเช่นกัน โดยการหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการมองชิ้นงานเข้าไปในแบบสองมิติเพื่อทำการหาแรงและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มากระทำกับชิ้นงานและการเขียนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อควบคุมการทำงาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) หรือการเขียนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงาน

คล้ายกับงานวิจัยของ Chanhom (2021) รวมทั้งในงานวิจัยของ Ismaal (2007) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ball and beam เช่นกัน ที่เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และบ่งบอกถึงแนวคิดในการมองโมเดลในรูปแบบสองมิติและแสดงวิธีการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) และนำมาทำวิธี state space equation โดยกำหนดตำแหน่งจุดหมุนของคานอยู่ที่ปลายสุดและรักษาสมดุลของคานให้ได้ตามแนวระนาบ ซึ่งวิธีการหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เป็นแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ LQR ในการควบคุมซึ่งผลที่ได้จากการทดลองใช้ในการควบคุมการทำงานพบว่ามีความผิดพลาดจากมุมที่กำหนดไปประมาณ ± 1 องศา ในส่วนระยะเวลาการเข้าสู่แนวระนาบของงานวิจัยนี้อยู่ที่ประมาณ 2 วินาที ซึ่งผลที่ได้น่าจะมาจากการที่ใช้ตัวควบคุมแบบ LQR ที่มีอัตราขยายที่คงที่ และได้มีการเลือกค่าอัตราขยายที่เหมาะสม

สรุป

จากการทำงานวิจัยเพื่อควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลโดยใช้ตัวควบคุมแบบ linear quadratic regulator (LQR) ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองและทดสอบการทำงานของชุดควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลแล้ว สามารถควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลได้ คือ สามารถทำให้แผ่นที่จะรักษาความสมดุลที่เอียงทำมุม ± 20 องศา เข้าสู่สภาวะสมดุลกลับคืนสู่แนวระนาบ ได้ในระยะเวลาประมาณ 2 วินาที และแผ่นรักษาความสมดุลจะมีค่าความผิดพลาดของมุมอยู่ที่ประมาณ ± 1 องศา ซึ่งผลที่ได้นี้ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่า

ตัวควบคุมแบบ LQR นี้สามารถนำมาเป็นตัวเลือกที่ใช้ในการควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลได้ และเพื่อเป็นการพัฒนาระบบควบคุมแผ่นรักษาความสมดุลให้สอดคล้องกับตัวควบคุมมากขึ้น เห็นว่าอาจจะนำตัวควบคุมชนิดอื่น ๆ มาทดลองควบคุมการทำงานของแผ่นรักษาความสมดุลต่อไปได้ รวมถึงตัวกรองที่อาจจะใช้ตัวอื่นมาช่วยนอกเหนือจาก first order filter เช่น Kalman filter หรือ complementary filter เพื่อให้ได้ค่าสัญญาณที่มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น อีกทั้งในส่วนของการขับเคลื่อนแผ่นรักษาความสมดุล อาจจะเปลี่ยนจากใช้อุปกรณ์การทำงานตัวอื่น เช่น การเปลี่ยนเซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนมาเป็นระบบนิวมेटิกส์ โดยควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว เพื่อใช้กระบอกสูบในการขับเคลื่อนให้มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น หรืออาจจะใช้ระบบไฮดรอลิกส์สำหรับงานที่รับภาระมาก ๆ ก็ได้ ซึ่งก็เป็นแนวความคิดทางเลือกในการจัดสร้างและนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมรวมถึงต้นทุนในการดำเนินการต่อไป

คำขอขอบคุณ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ได้สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินการวิจัยให้กับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- December 2011, from: http://www.rp.feri.uni-mb.si/pred_meti/skup_sem/projek1/shandor.pdf
- Hollis, R. L., Lawer, T. B., & Kantor, G. A. (2006). A Dynamically stable single-wheel mobile robot with inverse mouse-ball drive. *IEEE Int'l. Conference on Robotics and Automation* (pp. 2884-2889). Orlando: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Ismaal, H. A. (2007). *Ball and beam ELK 5320 neuro FUZZY system* (Master's thesis). Karadiniz technical university, Trabzon.
- Kheowree, T. (2018). Altitude control of an adaptive controller combine with Kalman filter for a mini-quadrotor aircraft. *RMUTSB Academic Journal*, 6(2), 148-156. (in Thai)
- Sangveraphunsiri, V. (2005). *Control of dynamics systems*. Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Wamjohi, W., & Cheever, E. (2005). *Ball and beam control theory demonstrater* (Master's thesis). Swartmore college, Pennsylvania.
- Wellstead, P. (2009). *Ball and beam 1-besic*. Retrieved 10 November 2011, from: <http://www.control-system-principle.co.uk/download.htm>
- Chanhom, P. (2021). Modeling and simulation of energy storage system with multiple energy storage devices using energy management at DC-bus. *RMUTSB Academic Journal*, 9(1), 52-68. (in Thai)
- Evanko, D., Dorrset, A., & Chu, C. (2005). *Ball on beam system with embradded controller*. Retrieved 5