การควบคุมความสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตด้วยตัวควบคุมพีไอดี

The Stabilize Control of Stewart Platform Manipulator by PID Controller

ชาติ ฤทธิ์หิรัญ[1] อนุชิต เจริญ[1] วิญญู แสวงสินกสิกิจ[1] และ คมกฤช แก่นทอง[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต winyu.saw@kbu.ac.th

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมความสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตด้วยตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart Platform) ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฐาน (Base Platform) ที่ติดตั้งชุดขับเคลื่อนแขนกลที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) จำนวน 6 ตัวเป็นตัวขับเคลื่อนโดยที่สามารถขับเคลื่อนแขนกลได้ 6 องศาอิสระ (Six Degree of Freedom) ที่จะกระทำไปยังส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Payload Platform) ที่อยู่ส่วนปลายของแขนกลด้านบน งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 6 ตัว เพื่อรักษาระดับของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ที่อยู่ด้านบนสุดของโครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตนี้ให้อยู่ในแนวระดับตลอดเวลา ไม่ให้เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมนี้ ก็สามารถควบคุมแขนกลให้รักษามุมของส่วนที่เคลื่อนที่ (Payload Platform) ที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตได้

คำสำคัญ: Stewart Platform, Parallel Manipulator

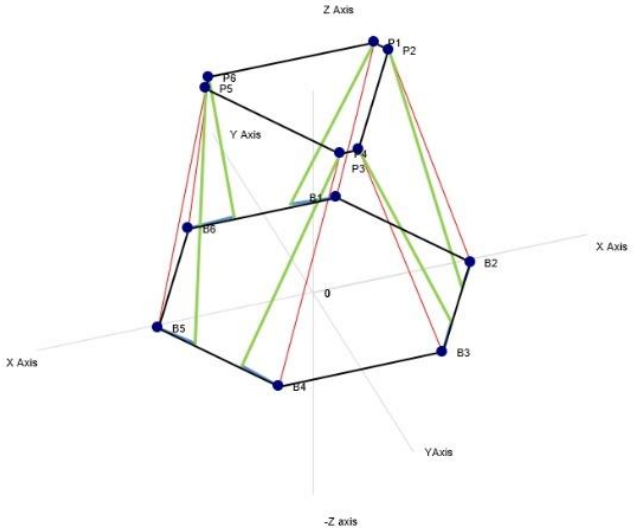
Abstract

This paper presents The Stabilize Control of Stewart Platform Manipulator by a PID controller. The Stewart platform in this study consists of a Base Platform, which is equipped with a mechanical arm actuator driven by six servo motors. The robotic arm acted on the Payload Platform at the end of the upper arm. In this paper, a PID controller was developed to control the operation of the six servo motors to maintain the level of Payload Platform at all times. The results show that this PID controller can control six servo motors to move the mechanical arm so that the Stewart Payload Platform remains stable.

Keywords: Stewart Platform, Parallel Manipulator

1. บทนำ

โครงสร้างของแขนกลที่มีใช้อยู่ทั่วไปนั้นส่วนมากจะมีโครงสร้างของแขนกลเป็นชนิดอนุกรม (Serial Manipulator) ที่มีโครงสร้างปลายของแขนกลแต่ละส่วนจะเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ ส่วนโครงสร้างแขนกลอีกแบบหนึ่งจะเป็นแขนกลชนิดข้อต่อขนาน (Parallel Manipulator) ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า สามารถที่จะรับแรงหรือน้ำหนักได้สูงกว่า เนื่องจากแรงนั้นกระจายไปยังตัวขับแต่ละตัวในแต่ละแขน และสามารถเคลื่อนที่ได้แม่นยำอีกด้วย โครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตนี้เป็นแขนกลแบบขนานที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย D. Stewart [1] ในปีคริสต์ศักราช 1965 ที่ใช้ในการพัฒนาเป็นโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) และได้มีการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวกับโครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตกันอย่างแพร่หลายดังเช่น [5], [6], [7] ซึ่งส่วนประกอบของโครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ ซึ่งส่วนประกอบของโครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนฐานที่อยู่กับที่ (Base Platform) และส่วนที่เคลื่อนที่ ๆ อยู่ด้านบน (Payload Platform) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยตัวขับเคลื่อน (Actuator) ที่เคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นจำนวน 6 ชุด เพื่อทำหน้าที่ขับส่วนแขนทั้ง 6 แขนให้มีความยาวที่แตกต่างกันไปเพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการได้ ซึ่งแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตแสดงให้เห็นดังรูปที่ 1

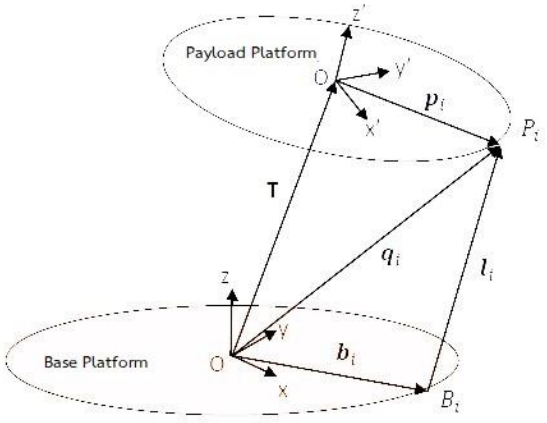


รูปที่ 1 แขนกลโครงสร้างแบบสจ๊วต

เมื่อ x, y, z, และ x′, y′, z′ เป็นตำแหน่งโคออดิเนต ที่จุดศูนย์กลางของ Base Platform และ Payload Platform ตามลำดับ และที่ Base Platform มีตำแหน่งโคออดิเนตของจุดรองรับขาของทั้ง 6 ขาดังนี้ [2]

$$B1 = \left(cos\frac{\pi}{12}, sin\frac{\pi}{12}, 0\right), \quad B2 = \left(cos\frac{7\pi}{12}, sin\frac{7\pi}{12}, 0\right),$$
$$B3 = \left(cos\frac{9\pi}{12}, sin\frac{9\pi}{12}, 0\right), \quad B4 = \left(cos\frac{15\pi}{12}, sin\frac{15\pi}{12}, 0\right),$$
$$B5 = (cos\frac{17\pi}{12}, sin\frac{17\pi}{12}, 0), \quad B6 = (cos\frac{23\pi}{12}, sin\frac{23\pi}{12}, 0)$$

พิจารณาที่ Payload Platform สำหรับแขนที่ i^{th} ดังรูปที่ 2 [3]



รูปที่ 2 โคออดิเนตของ Base Platform และ Payload Platform

พิกัด Q_i ของจุดยึด P_i เทียบกับจุดอ้างอิงที่ Base Platform จะถูกกำหนดโดยสมการ [3]

$$q_i = T + {}^{P}R_B \ .P_i \qquad (1)$$

ซึ่ง T จะเป็น Translation Vector ที่ให้การกระจัดเชิงเส้นตรงตำแหน่งของจุด Origin ของ Base Platform ที่สัมพันธ์กับจุดยึด P_i และจุดยึด P_i ก็เป็นเวกเตอร์ที่สัมพันธ์กันกับ Base Platform ด้วย ดังนั้นความยาวของแขนทั้ง 6 แขน จะเขียนได้เป็น

$$l_i = T + {}^{P}R_B \ .P_i - b_i \qquad (2)$$

เมื่อ b_i เป็นเวกเตอร์ที่กำหนดพิกัดของจุดยึดด้านล่างของ Base Platform ที่จุด B_i โดยที่ทั้ง 6 สมการจะให้ความยาวของแขนทั้ง 6 เพื่อให้ได้ตำแหน่งตามต้องการ ซึ่งก็เป็นการหมุนอาร์มของเซอร์โวมอเตอร์เพื่อให้ได้ระยะความยาวตามต้องการ

การจัดวางเรียงกันของเซอร์โวมอเตอร์นั้นจะทำให้แขนที่เป็นตัวเลขคู่และแขนที่เป็นตัวเลขคี่ให้การตอบสนองที่กลับกัน

ดังนั้นแขนที่เป็นเลขคู่จะเป็นดังสมการที่ (3), (4) และ (5) [3]

$$x_a = a\ \cos\alpha\ cos\beta + x_b \qquad (3)$$

$$y_a = a\ \cos\alpha\ cos\beta + y_b \qquad (4)$$

$$z_a = a\ \sin\alpha + z_b \qquad (5)$$

และแขนที่เป็นตัวเลขคี่ก็จะเป็นดังสมการที่ (6), (7) และ (8) [3]

$$x_a = a\ cos(\pi - \alpha)\ cos(\pi + \beta) + x_b \qquad (6)$$

$$y_a = a\ cos(\pi - \alpha)\ sin(\pi + \beta) + y_b \qquad (7)$$

$$z_a = a\ sin(\pi - \alpha) + z_b \qquad (8)$$

และจาก $sin(\pi - \alpha) = sin\alpha$ และ $cos(\pi - \alpha) = -cos\alpha$

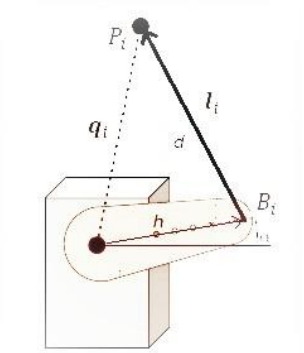
และ $sin(\pi + \beta) = -sin\beta$ และ $cos(\pi + \beta) = -cos\beta$

เมื่อ l_i เป็นความยาวของแขนที่ i^{th} ที่คำนวณจากสมการที่ (2)

α คือมุมของการหมุนอาร์มของเซอร์โวมอเตอร์ในแนว Horizontal

β คือมุมของการหมุนอาร์มของเซอร์โวมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับแกน X ซึ่งจะอยู่ในระนาบ X - Y โดยที่ Z = 0

ในการควบคุมอาร์มของเซอร์โวมอเตอร์เพื่อให้ระยะ l_i เปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 3 [4] นั้น เรายึดปลายแขนของเซอร์โวมอเตอร์ด้วยแกนเหล็กที่มีความยาวเท่ากับ d ที่ปลายหมุดยึดอาร์มเซอร์โวมอเตอร์ที่จุด B_i และปลายแกนเหล็กด้านบนจะยึดที่ Payload Platform ที่จุด P_i และระยะจากปลายอาร์มเซอร์โวมอเตอร์ที่จุดหมุดยึดถึงหัวแกนหมุนเซอร์โวมอเตอร์มีระยะ h และการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์จะทำมุมเท่ากับ α จากแนว Horizontal



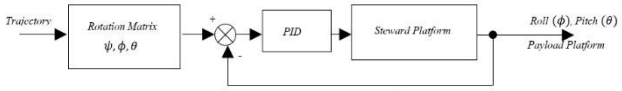
รูปที่ 3 การจับยึดอาร์มเซอร์โวมอเตอร์กับแขนกล

ดังนั้นแกนของเซอร์โวมอเตอร์จะหมุนไปด้วยค่ามุม α จากตำแหน่ง Horizontal ของมัน โดยที่ ψ, θ และ ϕ เป็นมุมที่หมุนรอบแกน x , y และ z ตามลำดับ และความยาวของแขนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

2. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ระบบการควบคุมของแขนกลที่ใช้ตัวขับเคลื่อนเป็นเซอร์โวมอเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมในการควบคุมมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform โดยให้รักษาค่า Set Point ที่จุดสมดุลที่มุม Roll (ϕ) = 0 องศา และมุม Pitch (θ) = 0 องศา ให้ได้ตลอดเวลา และที่ชุด Base Platform ไม่ได้ยึดตรึงอยู่กับที่ แต่ชุด Base Platform จะมีการหมุนเอียงรอบจุดศูนย์กลางของมันซึ่งจะมีผลให้ชุด Payload Platform จะมีการเปลี่ยนแปลงตามด้วยตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นไปตามเมทริกซ์ของการหมุน (Rotation Matrix) ในสมการที่ (1) และความยาวแขนที่ i^{th} ของแต่ละแกนของแขนกลจะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (2) ดังนั้นตัวควบคุมพีไอดีจะต้องควบคุมมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ให้ได้ 0 องศาตามต้องการ ซึ่งตัวควบคุมพีไอดีจะต้องมีความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Base

Platform ให้ได้ตลอดเวลา และรูปที่ 4 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม

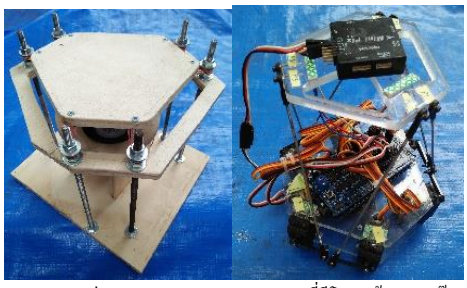
ตัวควบคุมพีไอดีจะมีรูปแบบสมการมาตรฐานที่สามารถเขียนอยู่ในรูปของ S- Domain ได้ดังนี้

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$$

โดยที่ k_p , k_i และ k_d เป็นเกนของตัวควบคุมพีไอดีตามลำดับ

3. การทดสอบระบบ

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบขึ้นจากตัว Platform ที่ทำมาจากแผ่นอะคริลิคหนา 5 มิลลิเมตร และมีเซอร์โวมอเตอร์ที่ควบคุมแขนกลทั้ง 6 แขน โดยมีขนาดโครงสร้าง กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และสูง 19 เซนติเมตร พร้อมแท่นหมุนที่ประกอบด้วยดีซีเกียร์มอเตอร์ (DC Gear Motor) เป็นตัวขับแท่นหมุนให้ชุดแขนกลนี้มีการเปลี่ยนแปลงมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ตลอดเวลาที่มอเตอร์ของแท่นหมุนกำลังหมุน และได้ติดตั้งตัวเซ็นเซอร์วัดมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ทั้งที่ตัว Base Platform และที่ Payload Platform และชุดควบคุมของระบบนี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เป็นตัวควบคุม และเขียนโปรแกรมควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 6 ตัว และชุดทดสอบระบบการรักษาสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5



ก) แท่นหมุน ข) แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

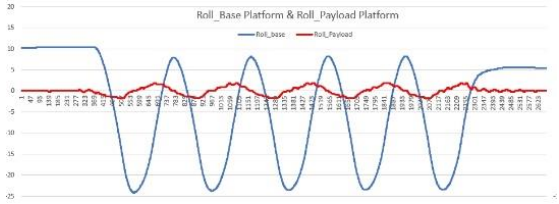
รูปที่ 5 ชุดทดสอบการรักษาสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ PID ของตัวควบคุมนั้น จะต้องดูค่าการควบคุมการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์จากตัวคอนโทรลเลอร์ ที่คำนวณค่าสัญญาณควบคุมที่ต้องการจากตัวควบคุม PID และค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะต้องสัมพันธ์กับค่า Pulse Width Modulation ที่เป็นสัญญาณควบคุมของเซอร์โวโมเตอร์ซึ่งต้องการให้อยู่ในช่วง 1000 – 2000 มิลลิวินาที และมีการจำกัดค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดของค่ามุมในการควบคุมด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของแขนของเซอร์โวมอเตอร์ในขอบเขตที่จำกัดตามโครงสร้างของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต แล้วจึงทดสอบการควบคุมแขนกลด้วยการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 6 ตัวด้วยมือก่อน แล้วจึงปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยใช้วิธี Trial and error โดยเริ่มปรับจูนค่า P ให้ตอบสนองต่อการควบคุมก่อน แล้วจึงค่อยปรับจูนค่า I และค่า D ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบในงานวิจัยนี้จะสร้างให้ระบบมีการรบกวนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยการสร้างมุมเอียงที่ฐานและให้มอเตอร์หมุนมุมเอียงนี้หมุนตลอดเวลา ซึ่งตัวควบคุม PID นี้จะต้องควบคุม Payload Platform ให้คงที่ทั้งมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ไม่ให้เปลี่ยนแปลงตามมุมอียงที่ Base Platform ให้ได้ตลอดเวลา ซึ่งระบบที่ควบคุมนี้จะเป็นการควบคุมแบบไดนามิคตลอดเวลา และการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

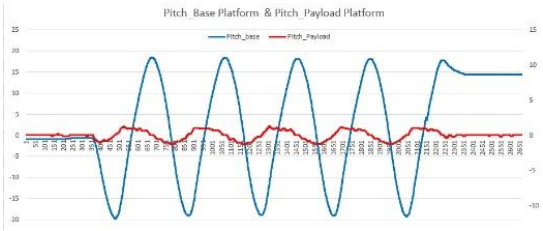
ตารางที่ 1 ค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในการทดสอบ

Control Gain	k_p	k_i	k_d
1.05	1.2	0.8	1.1

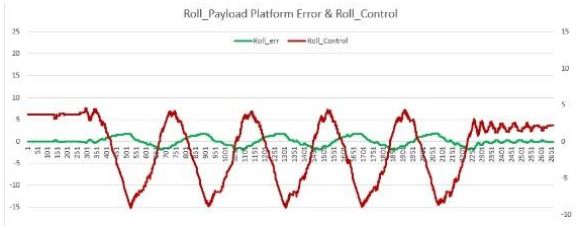
กราฟแสดงผลการควบคุมการรักษาสมดุลของมุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform เทียบกับ มุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Base Platform แสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 และกราฟแสดงค่าความผิดพลาดของ มุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform เมื่อเทียบกับค่าการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 และกราฟแสดงค่ามุม มุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform เทียบกับค่าการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 6 แสดงกราฟของมุม Roll (ϕ)ของ Payload Platform เทียบกับมุม Roll (ϕ) ของ Base Platform



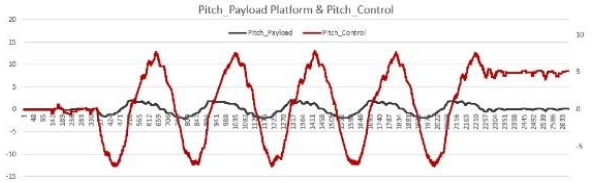
รูปที่ 7 แสดงกราฟของมุม Pitch (θ)ของ Payload Platform เทียบกับมุม Pitch (θ) ของ Base Platform



รูปที่ 8 แสดงกราฟค่าผิดพลาดของมุม Roll (ϕ)ของ Payload Platform เทียบกับค่าการควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์

รูปที่ 9 แสดงกราฟค่าผิดพลาดของมุม Pitch (θ)ของ Payload Platform เทียบกับค่าการควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์

รูปที่ 10 แสดงกราฟของมุม Roll (ϕ)ของ Payload Platform เทียบกับค่าการควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 11 แสดงกราฟของมุม Pitch (θ)ของ Payload Platform เทียบกับค่าการควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์

ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การควบคุมระบบที่จำลองขึ้นมานี้มีการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิคตลอดเวลา ซึ่งตัวควบคุมพีไอดี แบบดั้งเดิมนี้อาจจะไม่เหมาะที่สุด แต่สามารถปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ไม่ยาก และผลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ก็ให้การตอบสนองที่แตกต่างกัน แต่ในระบบที่ทดลองควบคุมนี้มีการเปลี่ยนแปลงของระบบตลอดเวลาแต่ก็ยังสามารถควบคุม มุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform ได้โดยที่มีค่าผิดพลาดประมาณ $\pm$ 3 องศา และถ้าหากมีการหยุดการทำงานของมอเตอร์หมุนแท่น Base Platform ซึ่งเปรียบเสมือนระบบหยุดนิ่ง ตัวควบคุมพีไอดีก็สามารถควบคุมให้มุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform หยุดนิ่งอยู่ที่มุม 0 องศาได้

4. สรุป

การควบคุมการรักษาสมดุลของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมนั้น ระบบควบคุมพยายามรักษามุม Roll (ϕ) และมุม Pitch (θ) ของ Payload Platform ให้ได้ที่ 0 องศา แต่ก็ยังคงมีค่าผิดพลาดตลอดเวลา ทั้งนี้ระบบควบคุมต้องมีการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งข้อนี้อาจต้องมีการปรับจูนค่าเกนการควบคุมใหม่ หรือทดสอบระบบกับตัวควบคุมชนิดอื่นที่ตอบสนองกับระบบที่เป็นไดนามิคได้ดีกว่านี้ เพื่อให้ได้ผลการควบคุมที่ดียิ่งขึ้น และตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิมนี้ก็ยังคงเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถพัฒนาใช้กับระบบได้หลากหลายแม้ว่าจะมีค่าผิดพลาดอยู่บ้าง และระบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] D.A. Stewart. “Platform with six degrees of freedom,” In Proc. Of the Instutute of mechanical engineers, Vol.180 (Part 1, 15), 1965, pp. 371–386.

[2] T.Charters et al. “Detecting Singularities of Stewart Platforms,” Mathematics-in-Industry Case Studies Journal, Volume 1, 2009, pp. 66-80.

[3] Online. “The Mathematics of the Stewart Platform,” Retrieved August 25, 2021, from https://cdn.instructables.com/ORIG/FFI/8ZXW/I55MMY14/FFI8ZXWI55MMY14.pdf

[4] Online. “Inverse Kinematics of Stewart Platform,” Retrieved August 25, 2021, from https://www.xarg.org/paper/inverse-kinematics-of-a-stewart-platform/

[5] Muhammad F. S. et al. “PID Control and Stability Analysis of an i^{th} leg of Six Degree of Freedom Machining Bed,” 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, pp. 927-934.

[6] Merlet J-P. “Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators,” International Journal of Robotics Research, 11(2), April, 1992, pp. 150-162.

[7] Charles C. N. et al. “Analysis and implementation of 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist,” Computer & Electrical Engineering, Vol. 17, Issue 3, 1991, pp. 191-203.