

โครงการวิจัย ระบบขับเคลื่อนสองล้อซ้ายขวาทรงตัวอัตโนมัติ
Two wheels with Self Balancing System

ชื่อผู้วิจัย	นายสุเชียร	เกียรติสุนทร
	Mr. SUTHIAN	KIATSUNTHORN
	นายสุมิตร	พนาอุดมทรัพย์
	Mr. SUMIT	PANAUDOMSUP
	นายคงศักดิ์	อนันตหิรัญรัตน์
	Mr. KONGSAK	ANUNTAHIRUNRAT
	นายนพดล	มณีรัตน์
	Mr. NOPPADOL	MANEERAT

หน่วยงานที่รับผิดชอบงานวิจัย และที่อยู่

แผนก/สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดและควบคุม
กอง/คณะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
กรม/มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กระทรวง/ทบวง	กระทรวงศึกษาธิการ
ที่อยู่	ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์	02-329-8353 โทรสาร 02-329-8354

สง.หมุ่
เลขทะเบียน 115582
วัน,เดือน,ปี. 21 ส.ค. 2554

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้กล่าวถึงยานพาหนะที่ขับเคลื่อนสองล้อซ้ายขวาที่สามารถทรงตัวอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์ควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก และออกแบบระบบควบคุมพื้นฐานให้มีความซับซ้อนน้อยที่สุด แต่ชดเชยประสิทธิภาพการควบคุมโดยอาศัยความสามารถการขับขี่ของผู้โดยสาร ซึ่งจะเน้นการลดต้นทุนการสร้าง เพื่อที่จะสามารถผลิตและใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์

Abstract

This research presents an automatic moving control vehicle (segway) which is controlled using a microcontroller. The basis control system is designed to has least complexity but can compensate the control efficiency by the driving ability of passenger. This research reduces the production cost which can be the practical and commercial product.

b. 12312794
i.

3. แบตเตอรี่สำหรับจ่ายพลังงานขับเคลื่อนจะใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแทนแบตเตอรี่แห้งแต่ ชั่วโมงการใช้งานต่อการชาร์ตหนึ่งครั้งจะสั้นลง

4. อุปกรณ์ควบคุมใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ขนาดเล็ก โดยออกแบบระบบควบคุมพื้นฐานที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด แต่ชดเชยประสิทธิภาพการควบคุมโดยอาศัยความสามารถการขับขี่ของผู้โดยสารแทน

โครงการวิจัยนี้ แม้จะมีงานวิจัยอื่นที่คล้ายคลึงกันทั้งในประเทศและต่างประเทศ แต่ วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยอื่นอาจมุ่งปรับปรุงระบบควบคุมเดิม หรือ ออกแบบระบบควบคุมใหม่ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เรื่อยๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ไม่สามารถลดราคาของ segway หรือ พาหนะอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันให้ถูกลง ต่างจากโครงการวิจัยที่นำเสนอ ซึ่ง ต้องการออกแบบยานพาหนะที่สามารถผลิตและใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ สร้างรถขับเคลื่อนสองล้อทรงตัวอัตโนมัติ สามารถโดยสารและขับขี่ได้จริง โดยใช้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ทั้งหมดจากตลาดภายในประเทศ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัย ประกอบด้วย จัดสร้างรถขับเคลื่อนสองล้อทรงตัวอัตโนมัติ สามารถโดยสารและขับขี่ได้จริง โดยใช้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ทั้งหมดจากตลาดภายในประเทศ เพื่อสามารถนำไปผลิตเป็นเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น การทรงตัว การควบคุมมอเตอร์ และ ระบบตรวจการเอียง
- 1.4.2 วิเคราะห์ขนาดตัวรถหาขนาดที่เหมาะสมและสร้างขึ้นมา
- 1.4.3 สร้างวงจรควบคุมและทดลองสอบการทำงานการเคลื่อนที่ของแต่ละส่วน
- 1.4.4 วางแผนและเขียนโปรแกรมควบคุม
- 1.4.5 ทดสอบระบบโดยรวมทั้งหมด
- 1.4.6 สรุปทำรายงาน

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย (ให้ระบุขั้นตอนอย่างละเอียด)

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												หมายเหตุ	
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.		
สร้างตัวรอด	←	-----	-----	-----	-----	-----	-----	→						
สร้างตัวควบคุม	←	-----	-----	-----	-----	-----	-----	→						
เขียนโปรแกรม				←	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	→		
ทดลองระบบ						←	-----	-----	-----	-----	-----	→		
ปรับปรุง								←	-----	-----	-----	→		
สรุปรายงาน												←	→	



บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของส่วนประกอบ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมดุล ดังนี้

- กระบวนการรักษาสมดุล
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมดุล
- หลักการทำงานของเซนเซอร์
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการควบคุม
- ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุม
- ไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1 กระบวนการรักษาสมดุล

กระบวนการรักษาสมดุลของตัวรถ ได้นำหลักการการควบคุมการทรงตัวแบบลูกตุ้ม นาฬิกาหัวกลับ หรือทฤษฎีอินเวอร์ทเพนดูลัมมาใช้ อินเวอร์ทเพนดูลัมก็คือเพนดูลัมที่มีมวลอยู่ที่เหนือแกนหมุน และเป็นระบบที่ไม่เสถียรแตกต่างจากเพนดูลัมธรรมดา ดังนั้นการสร้างสมดุลให้กับอินเวอร์ทเพนดูลัม ก็คือ การทำให้แกนหมุนตั้งตรงอยู่เสมอ



รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเพนดูลัมธรรมดา และอินเวอร์ทเพนดูลัม

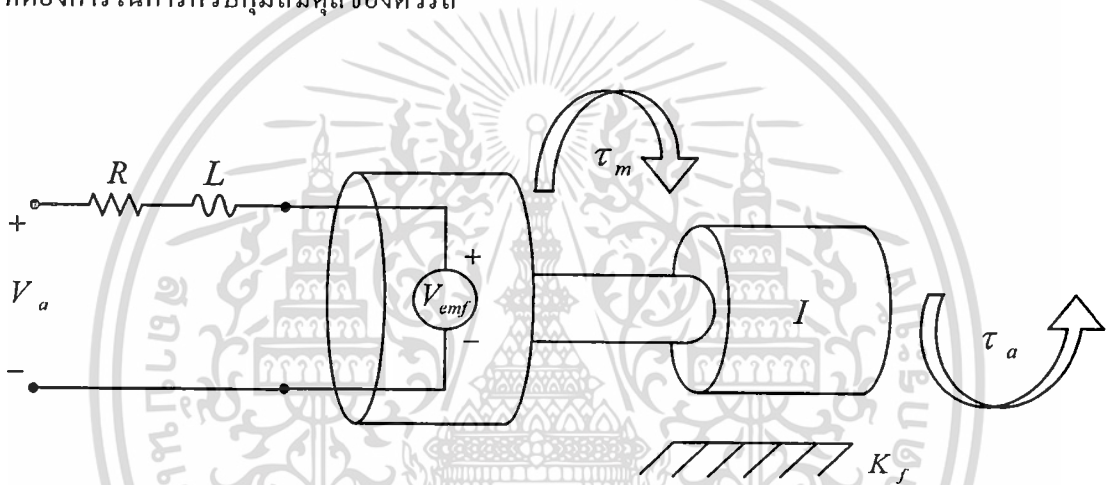
ดังนั้นในการออกแบบตัวรถ จะต้องรักษาสมดุลของผู้ขับขี่ให้อยู่นิ่ง และสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือข้างหลังได้โดยไม่ล้ม โดยอาศัยการโน้มตัวของผู้ขับขี่ เป็นการเลียนแบบการเดินของคนเรา เพื่อให้ผู้ใช้บังคับควบคุมได้ง่ายและเป็นธรรมชาติ เห็นได้ว่าเวลาที่เราจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เราก็ต้องโน้มตัวไปข้างหน้าก่อน จากนั้นก็ก้าวเท้าข้างใดข้างหนึ่งตามไปเพื่อยันตัวไว้ไม่ให้ล้ม โดยหลักการทำงานจะใช้ตัวตรวจจับมุมที่ตัวรถเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะสมดุล (90°) เช่น เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope) และเซนเซอร์ความเร่ง ที่ให้สัญญาณเอาท์พุทเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นค่าที่ได้จะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผล เพื่อทำการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ขับเคลื่อนตัวรถด้วยระยะทางสอดคล้องกับค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเหมาะสม

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมุม

ในโครงการเรื่องรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมุม ระบบพลวัตของตัวรถสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาในการออกแบบตัวควบคุมสมดุให้กับตัวรถ ดังนั้นในหัวข้อนี้กล่าวถึง แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ล้อ และก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งทั้งหมดนี้จะได้ออกมาเป็นสมการในการเคลื่อนที่ของตัวรถ

2.2.1 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงระบบพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยแบบจำลองปริภูมิสเทท โดยอธิบายจากความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และแรงบิด (Torque) ที่ต้องการในการควบคุมสมดุของตัวรถ



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.2 เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับแรงดันไฟฟ้าอินพุท $V_a(t)$ เข้ามา ผ่านตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมอยู่ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้า $i(t)$ ในขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) และมอเตอร์จะส่งแรงบิดออกไปเป็นเอาต์พุท ซึ่งค่าแรงบิด $\tau_m(t)$ ของมอเตอร์เป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้า $i(t)$ โดยมีค่า k_m เป็นค่าคงที่ของแรงบิด

$$\tau_m(t) = k_m i(t) \quad (2.2.1)$$

เมื่อมีแรงบิด คอยล์ของมอเตอร์จะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega(t)$ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าต้านกลับขึ้น (Back electromotive force voltage, $V_{emf}(t)$) โดยมีค่า k_e เป็น ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ (2.2.2)

$$V_{emf}(t) = k_e \omega(t) \quad (2.2.2)$$

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) สามารถสร้างสมการอนุพันธ์เชิงเส้น (Linear differential) ของมอเตอร์ ได้ดังนี้

$$V_a(t) - Ri(t) - L \frac{di(t)}{dt} - V_{emf}(t) = 0 \quad (2.2.3)$$

เมื่อ R และ L คือค่าตัวต้านทาน และค่าตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมอยู่ในขดลวดอาร์มเจอร์

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ และจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน แรงเสียดทานของมอเตอร์สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นของความเร็ว เมื่อสัมพันธ์แรงเสียดทานของแกนมอเตอร์คือ k_f และผลรวมของแรงบิด เท่ากับ ความเร่งที่แกนมอเตอร์ คูณกับค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ $I_R(t)$ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum M(t) = \tau_m(t) - k_f \omega(t) - \tau_a(t) = I_R \dot{\omega}(t) \quad (2.2.4)$$

จากสมการที่ (2.2.1) ถึง (2.2.4) สามารถจัดรูปสมการใหม่ และเขียนแทนด้วยสมการของมอเตอร์พื้นฐานสองสมการ คือ

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) - \frac{k_e}{L} \omega(t) + \frac{V_a(t)}{L} \quad (2.2.5)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_m}{I_R} i(t) - \frac{k_f}{I_R} \omega(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.2.6)$$

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและแรงเสียดทานของมอเตอร์ โดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก ดังนั้น หากประมาณให้ค่าทั้งสองเป็นศูนย์ จะได้สมการอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2.2.7) และ (2.2.8)

$$i(t) = -\frac{k_e}{R} \omega(t) + \frac{1}{R} V_a(t) \quad (2.2.7)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_m}{I_R} i(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.2.8)$$

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.2.7) และ (2.2.8) สามารถเขียนสมการใหม่ โดยแทนตัวแปรกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.2.7) ลงในสมการที่ (2.2.8) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{k_m k_e}{I_R R} \omega(t) + \frac{k_m}{I_R R} V_a(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.2.9)$$

ระบบพลวัตของมอเตอร์สามารถแสดงเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะได้ด้วยตัวแปรตำแหน่งเชิงมุม $\theta(t)$ และตัวแปรความเร็วเชิงมุม $\omega(t)$ เมื่ออินพุทของมอเตอร์คือแรงดันไฟฟ้าและแรงบิด จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบพลวัตของมอเตอร์ดังนี้

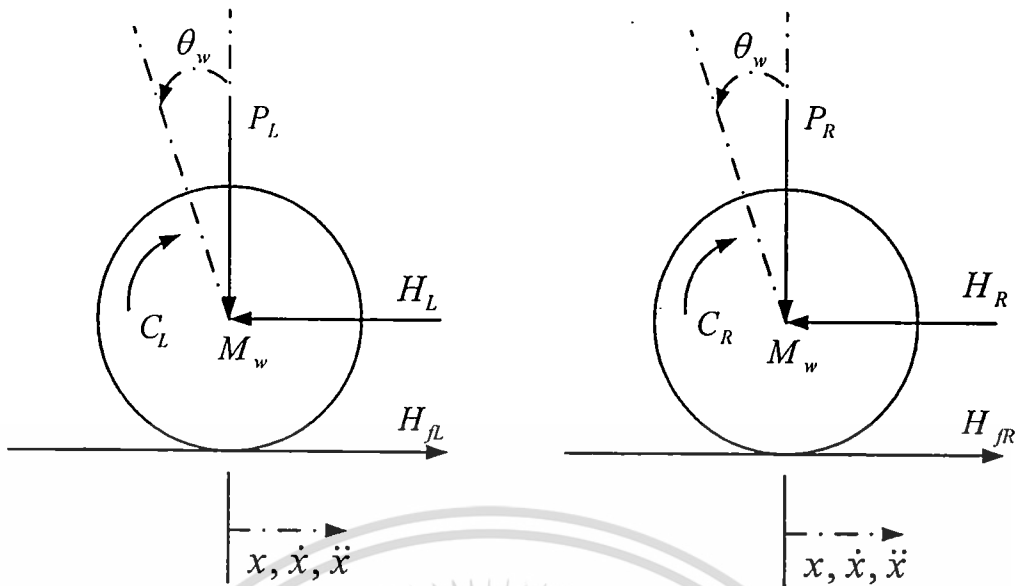
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k_m k_e}{I_R R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_m}{I_R R} & -\frac{1}{I_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ \tau_a(t) \end{bmatrix} \quad (2.2.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ \tau_a(t) \end{bmatrix} \quad (2.2.11)$$

2.2.2 แบบจำลองของล้อ

รถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสถิต มีระบบเชิงกลที่คล้ายคลึงกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ในตอนแรกเราจะวิเคราะห์ระบบของล้อและโครงสร้างของรถแยกกัน แต่สุดท้ายระบบทั้งสองต้องถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการรักษาสมดุลของตัวรถร่วมกัน

เมื่อตัวรถถูกทำให้เบี่ยงเบนออกจากสมดุล แรงบิดจะถูกส่งออกจากมอเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงปรับเปลี่ยนไปตามแรงที่เกิดขึ้น เริ่มต้นจากสมการการเคลื่อนที่ของล้อซ้าย และล้อขวา ซึ่งได้มาจากการเขียนแผนภาพแรงของล้อทั้งสอง จากนั้นจะได้สมการสำเร็จของล้อทั้งสองที่เหมือนกัน โดยในที่นี้จะแสดงเฉพาะสมการจากล้อขวา



รูปที่ 2.3 แผนภาพแรงของล้อทั้งสอง

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ผลรวมของแรงในแนวนอน อธิบายได้ดังสมการที่ (2.2.12) เมื่อ M_w คือ มวลของล้อ $\ddot{x}(t)$ คือ ความเร่งในแนวนอน H_{fR} คือ แรงเสียดทานระหว่างพื้นกับล้อ และ H_R คือ แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อกับตัวรถในแนวนอน

$$\sum F(t) = Ma(t)$$

$$M_w \ddot{x}(t) = H_{fR}(t) - H_R(t) \quad (2.2.12)$$

และผลรวมของแรงที่กระทำที่จุดศูนย์กลางของล้อ อธิบายได้โดยสมการที่ (2.2.13) เมื่อ I_w คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ θ_w คือ มุมที่หมุนของล้อ C_R คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่กระทำต่อล้อ และ r คือ รัศมีของล้อ

$$\sum M_o(t) = I\alpha(t)$$

$$I_w \ddot{\theta}_w(t) = C_R(t) - rH_{fR}(t) \quad (2.2.13)$$

จากสมการพลวัตของมอเตอร์ในสมการที่ (2.2.4) เมื่อพิจารณาที่ $k_f = 0$ แรงบิดของมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2.14)

$$\tau_m(t) = I_R \frac{d\omega(t)}{dt} + \tau_a(t) \quad (2.2.14)$$

เมื่อจัดรูปสมการ และแทนค่าพารามิเตอร์จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะได้สมการของแรงบิดเอาท์พุทสุทธิที่ให้กับล้อ ดังนี้

$$C_R(t) = I_R \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{R} V_a(t) \quad (2.2.15)$$

เพราะฉะนั้นสามารถเขียนสมการ (2.2.13) ใหม่ได้ดังนี้

$$I_w \ddot{\theta}_w(t) = -\frac{k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{R} V_a(t) - r H_{JR}(t) \quad (2.2.16)$$

ดังนั้นจะได้

$$H_{JR}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) \quad (2.2.17)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.2.15) แทนในสมการที่ (2.2.12) จะได้สมการสำหรับล้อทางซ้าย และขวาดังนี้

สมการล้อทางซ้าย

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) - H_L(t) \quad (2.2.18)$$

สมการล้อทางขวา

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) - H_R(t) \quad (2.2.19)$$

เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของล้อ การเคลื่อนที่เชิงมุม สามารถแปลงเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\ddot{\theta}_w(t)r = \ddot{x}(t) \quad \text{หรือ} \quad \ddot{\theta}_w(t) = \frac{\ddot{x}(t)}{r}$$

$$\dot{\theta}_w(t)r = \dot{x}(t) \quad \text{หรือ} \quad \dot{\theta}_w(t) = \frac{\dot{x}(t)}{r}$$

ดังนั้นสมการที่ (2.2.18) และ (2.2.19) สามารถแปลงเป็นสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ ดังนี้

สมการล้อทางซ้าย

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x}(t) - H_L(t) \quad (2.2.20)$$

สมการล้อทางขวา

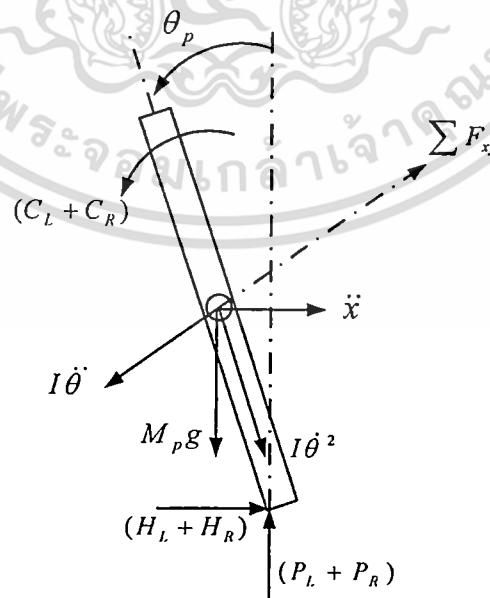
$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x}(t) - H_R(t) \quad (2.2.21)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.2.20) และ (2.2.21) มารวมกัน จะได้เป็นสมการรวมของล้อทั้งสอง ดังนี้

$$2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x}(t) = -\frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{Rr} V_a(t) - (H_L(t) + H_R(t)) \quad (2.2.22)$$

2.2.3 แบบจำลองของก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม

ในการวิเคราะห์ระบบเชิงกลของรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสถิต เราสามารถเปรียบเทียบโครงสร้างของตัวรถและผู้ขับขี่ ให้เป็นเสมือนก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม และการวิเคราะห์ระบบเชิงกลของก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม มีความต่อเนื่องมาจากการวิเคราะห์ระบบเชิงกลของล้อ โดยสามารถแสดงแผนภาพแรงของก้านอินเวอร์ทเพนดูลัมได้ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.4 แผนภาพแรงของก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ผลรวมของแรงในแนวนอน อธิบายได้ดังสมการที่ (2.2.23)

$$\sum F_x(t) = M_p \ddot{x}(t)$$

$$(H_L(t) - H_R(t)) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) + M_p l \dot{\theta}_p^2(t) \sin \theta_p(t) = M_p \ddot{x}(t) \quad (2.2.23)$$

ดังนั้นจะได้

$$(H_L(t) - H_R(t)) = M_p \ddot{x}(t) + M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) - M_p l \dot{\theta}_p^2(t) \sin \theta_p(t) \quad (2.2.24)$$

โดย M_p คือ มวลของรถและผู้ขับขี่

l คือ ความสูงของก้านเพนดูลัม (ความสูงของผู้ขับขี่)

θ_p คือ มุมที่ก้านเพนดูลัมเบี่ยงเบนจากแกนสมดูล

และผลรวมแรงในแนวตั้งฉากของก้านเพนดูลัม อธิบายได้ดังสมการที่ (2.2.25) เมื่อ P_L, P_R คือ แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อและตัวรถแนวตั้ง

$$\sum F_{xp}(t) = M_p \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t)$$

$$(H_L(t) + H_R(t)) \cos \theta_p(t) + (P_L(t) + P_R(t)) \sin \theta_p(t) - M_p g \sin \theta_p(t) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) = M_p \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t) \quad (2.2.25)$$

ผลรวมของโมเมนต์ที่จุดศูนย์กลางมวลของก้านเพนดูลัม คือ

$$\sum M_o(t) = I \alpha(t)$$

$$-(H_L(t) + H_R(t)) l \cos \theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t)) l \sin \theta_p(t) - (C_L(t) + C_R(t)) = I_p \ddot{\theta}_p(t) \quad (2.2.26)$$

จากสมการที่ (2.2.15) แรงบิดจากมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมสมดูลของก้านเพนดูลัม เมื่อผ่านการแปลงเชิงเส้น (Linear transformation) หรือแผนภาพเชิงเส้น (Linear map) จะได้สมการดังนี้

$$(C_L(t) + C_R(t)) = \frac{-2k_m k_e \dot{x}(t)}{R} + \frac{2k_m}{R} V_a(t)$$

ซึ่งสามารถแทนค่าในสมการที่ (2.2.26) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & -(H_L(t) + H_R(t))l \cos \theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l \sin \theta_p(t) \\ & - \left(\frac{-2k_m k_e \dot{x}(t)}{R} + \frac{2k_m}{R} V_a(t) \right) = I_p \ddot{\theta}_p(t) \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} & -(H_L(t) + H_R(t))l \cos \theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l \sin \theta_p(t) \\ & = I_p \ddot{\theta}_p(t) - \frac{2k_m k_e \dot{x}(t)}{R} + \frac{2k_m}{R} V_a(t) \end{aligned} \quad (2.2.27)$$

คูณสมการที่ (2.2.25) ด้วย $-l$

$$\begin{aligned} & -(H_L(t) + H_R(t))l \cos \theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l \sin \theta_p(t) \\ & + M_p g l \sin \theta_p(t) + M_p l^2 \ddot{\theta}_p(t) = -M_p l \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t) \end{aligned} \quad (2.2.28)$$

แทนค่าในสมการที่ (2.2.27) ในสมการที่ (2.2.28)

$$\begin{aligned} & I_p \ddot{\theta}_p(t) - \frac{2k_m k_e \dot{x}(t)}{Rr} + \frac{2k_m}{R} V_a(t) + M_p l^2 \ddot{\theta}_p(t) \\ & + M_p g l \sin \theta_p(t) = -M_p l \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t) \end{aligned} \quad (2.2.29)$$

เพื่อกำจัด $(H_R(t) + H_L(t))$ จากสมการของมอเตอร์ แทนสมการที่ (2.2.24) ในสมการที่ (2.2.22) จะได้

$$\begin{aligned} 2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x}(t) & = -\frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{Rr} V_a(t) - M_p \ddot{x}(t) \\ & - M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) + M_p l \dot{\theta}_p^2(t) \sin \theta_p(t) \end{aligned} \quad (2.2.30)$$

จัดรูปสมการที่ (2.2.29) และ (2.2.30) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบดังนี้

$$\begin{aligned} (I_p + M_p l^2) \ddot{\theta}_p(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{R} V_a(t) \\ + M_p g l \sin \theta_p(t) = -M_p l \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t) \end{aligned} \quad (2.2.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{2k_m}{Rr} V_a(t) = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x}(t) + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) \\ + M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) - M_p l \dot{\theta}_p(t) \sin \theta_p(t) \end{aligned} \quad (2.2.32)$$

จากสมการที่ (2.2.31) และ (2.2.32) ข้างต้น สามารถทำการประมาณเชิงเส้น (Linearization) เพื่อให้ได้แบบจำลองปริภูมิสเททเชิงเส้น เมื่อพิจารณา $\theta_p = \pi + \phi$ โดย ϕ คือ มุมขนาดเล็กที่เบี่ยงเบนออกจากแนวตั้งฉาก สามารถประมาณ

$$\cos \theta_p(t) \cong -1, \quad \sin \theta_p(t) \cong -\phi(t) \quad \text{และ} \quad \left(\frac{d\theta_p(t)}{dt} \right)^2 \cong 0$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ซึ่งได้จากการประมาณเชิงเส้น อธิบายได้โดย

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\phi}(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{R} V_a(t) - M_p g l \phi(t) = M_p l \ddot{x}(t) \quad (2.2.33)$$

$$\frac{2k_m}{Rr} V_a(t) = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x}(t) + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) - M_p l \ddot{\phi}(t) \quad (2.2.34)$$

จัดรูปสมการที่ (2.2.33) และ (2.2.34) ให้อยู่ในรูปของตัวแปรสเททจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}(t) = \frac{M_p l}{(I_p + M_p l^2)} \ddot{x}(t) + \frac{2k_m k_r}{Rr(I_p + M_p l^2)} \dot{x}(t) \\ - \frac{2k_m}{R(I_p + M_p l^2)} V_a(t) + \frac{M_p g l}{(I_p + M_p l^2)} \phi(t) \end{aligned} \quad (2.2.35)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) = \frac{2k_m}{Rr \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} V_a(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr^2 \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \dot{x}(t) \\ + \frac{M_p l}{\left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \ddot{\phi}(t) \end{aligned} \quad (2.2.36)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.2.35) ในสมการที่ (2.2.34) และสมการที่ (2.2.36) ในสมการที่ (2.2.33) และจัดรูปสมการ จะได้สมการปริภูมิสถานะของระบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2k_m k_e (M_p l r - I_p - M_p l^2)}{R r^2 \alpha} & \frac{M_p^2 g l^2}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2k_m k_e (r \beta - M_p l)}{R r^2 \alpha} & \frac{M_p g l \beta}{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_m (I_p + M_p l^2 - M_p l r)}{R r \alpha} \\ 0 \\ \frac{2k_m (M_p l - r \beta)}{R r \alpha} \end{bmatrix} V_a$$

เมื่อกำหนดให้

$$\beta = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \quad \alpha = \left[I_p \beta + 2M_p l^2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \right]$$

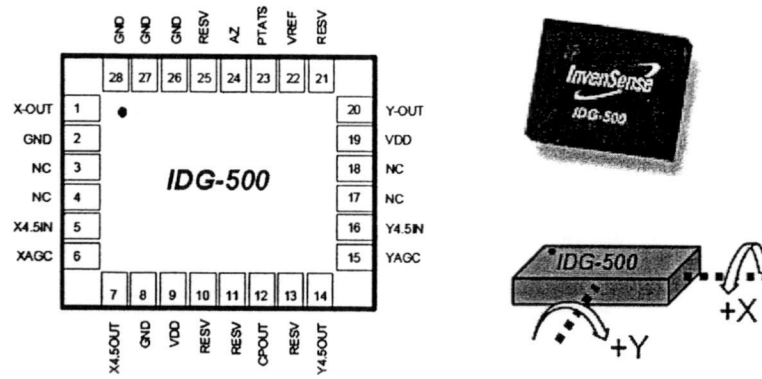
จากแบบจำลองปริภูมิสถานะข้างต้น กำหนดให้ล้อของตัวรถสัมผัสกับพื้นตลอดเวลา ไม่มีการเลื่อนไถลของล้อ และไม่มีแรงเสียดทานเชิงมุมของล้อ

2.3 หลักการทำงานของเซนเซอร์

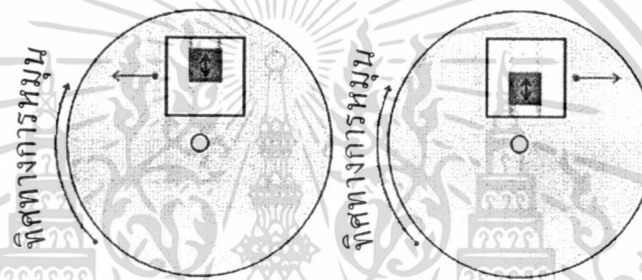
ในโครงการรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมดุล ได้นำอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือเซนเซอร์มาใช้ เพื่อให้สามารถรับรู้ได้ถึงปริมาณทางฟิสิกส์ที่ต้องการทราบค่า จากนั้นเก็บค่าเหล่านั้นไว้เป็นข้อมูลตัวแปรที่สำคัญ เช่น มุม ความเร็ว และความเร่ง ปริมาณเหล่านี้จะถูกนำไปประมวลผลในส่วนชุดควบคุมเพื่อควบคุมรักษาสภาวะสมดุลของตัวรถ เซนเซอร์ที่เลือกใช้ในโครงการนี้ ได้แก่ เซนเซอร์ไจโรสโคป และ เซนเซอร์ความเร่ง ซึ่งหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงหลักการทำงานของเซนเซอร์เหล่านี้

2.3.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป

ในโครงการนี้ได้ใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปแบบสองแกนเบอร์ IDG500 ดังรูปที่ 2.5 เป็นเซนเซอร์ประเภทเรทไจโร (Rate gyro) สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้สองแกน ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน หรืออัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับศูนย์ สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาเป็นค่าความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ 1.35 โวลต์ และจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง 2 มิลลิโวลต์/องศา/วินาที ตามทิศทางการหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วยเฟรมหมุนที่ติดมวลขนาดเล็กไว้ ดังรูปที่ 2.6 เพื่อใช้วัดความเร่งคอริโอลิส (Coriolis acceleration)

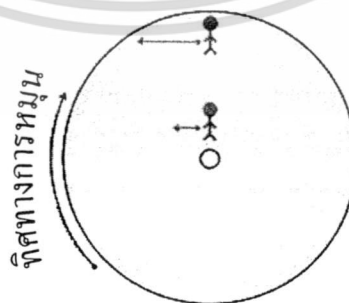


รูปที่ 2.5 เซนเซอร์ไจโรสโคปเบอร์ IDG500



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภายในของไจโรสโคป

ความเร่งคอรีโอลิสเป็นความเร่งที่เกิดกับวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน สามารถอธิบายได้จากการจินตนาการถึงการเคลื่อนที่บนเฟรมหมุนของคนสองคนดังรูปที่ 2.7 เพื่อรักษาตำแหน่งเดิมของเขาไว้ เขาทั้งสองจะต้องเดินสวนทางกับทิศทางหมุนของเฟรมด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งไม่เท่ากัน โดยคนที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางเฟรมเขาจะต้องใช้ความเร็วมากกว่าคนที่อยู่ใกล้ อัตราความเร็วที่เขาใช้เพิ่มขึ้นก็ของความเร่งคอรีโอลิส



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างแสดงความเร่งคอรีโอลิส

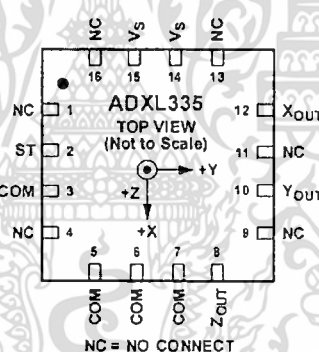
2.3.2 เซนเซอร์ความเร่ง

เซนเซอร์ ความเร่งใช้วัดความเร่งที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ นอกจากนี้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาเวกเตอร์ลัพธ์ของความเร่ง วัดความโน้มเอียง และความสั่นสะเทือน จากความสามารถที่หลากหลายดังกล่าวจึงนำมาประยุกต์เพื่อใช้หามุมที่เปลี่ยนแปลงได้

เซนเซอร์ความเร่งที่ใช้ในโครงงานรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสมดุล คือเซนเซอร์เบอร์ ADXL335 ดังรูปที่ 2.8 มีความสามารถวัดได้ สามแกน ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยที่ขณะความเร่งเท่ากับศูนย์ให้เอาต์พุตมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 1.5 โวลต์ และมีค่าเพิ่มหรือลดตามทิศทางความเร่งที่เปลี่ยนแปลงด้วยอัตรา 300 มิลลิโวลต์/จี การนำเซนเซอร์ความเร่งมาหามุมทำได้โดยใช้ความเร่งจากสองแกน ในโครงงานได้เลือกใช้แกน X และแกน Z โดยนำความเร่งจากที่วัดได้จากทั้งสองแกน นำมาแปลงด้วยสมการ

$$\text{Angle} = \tan^{-1} \frac{z}{x} \quad (2.3.1)$$

โดยที่ *Angle* คือค่าของมุม *z* คือความเร่งแกน Z และ *x* คือค่าความเร่งแกน X



รูปที่ 2.8 เซนเซอร์ความเร่งเบอร์ ADXL335

2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการควบคุม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางอุตสาหกรรม เพราะมีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมความเร็ว และประยุกต์ใช้งาน ได้หลายด้าน จึงนิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรม ในการศึกษาเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงควรรู้จักส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เข้าใจหลักการทำงานและหลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.4.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ สเตเตอร์ และ โรเตอร์

2.4.1.1 สเตเตอร์

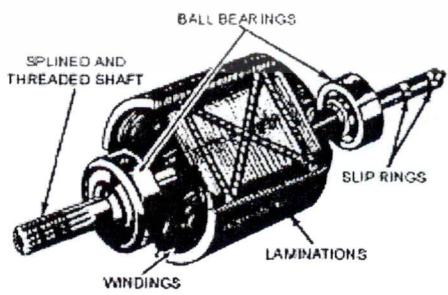
สเตเตอร์คือส่วนที่ยึดอยู่กับที่ ประกอบด้วย เฟรม (Frame) เป็นโครงภายนอก ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ดังรูปที่ 2.9 และยึดส่วนประกอบอื่นๆให้แข็งแรง ทำด้วยเหล็กแผ่นหนาม้วนเป็นรูปกระบอก ขั้วแม่เหล็ก (Pole) ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แกนขั้วแม่เหล็กและขดลวด โดยแกนขั้ว (Pole Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง กั้นด้วยฉนวนประกอบด้วยแท่งยึดติดกับเฟรม และส่วนขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) พันอยู่รอบแกนของขั้วแม่เหล็ก ทำหน้าที่รับกระแสจากภายนอกเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะหักล้างและเสริมกันกับสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์ (Armature) ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น



รูปที่ 2.9 สเตเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรง แบบ 2 โพล และแบบ 4 โพล

2.4.1.2 โรเตอร์

โรเตอร์ คือส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งมีขดลวดอาร์เมเจอร์พันอยู่บนแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature Core) และมีคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ยึดติดอยู่ที่ส่วนปลายของขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังรูปที่ 2.10 ในส่วนนี้คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่านคาร์บอน (Carbon Brushes) ที่อยู่ในมอเตอร์เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น จึงเกิดการหักล้างและการเสริมกันกับสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนได้



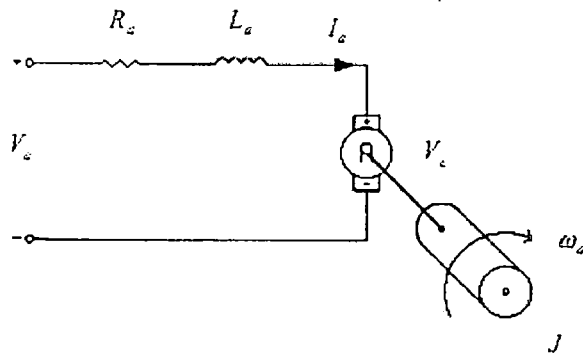
รูปที่ 2.10 โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบที่สำคัญของ โรเตอร์มีดังนี้

- แกนเพลลา (Shaft) ใช้สำหรับยึดตัวคอมมิวเตเตอร์และแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ประกอบกันเป็นตัวโรเตอร์ แกนเพลลานี้วางอยู่บนแบร์ริงเพื่อบังคับให้หมุนอยู่หนึ่ง ไม่มีการสั่นสะเทือน
- แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ ออบจนวน (Laminated Sheet Steel) เป็นที่สำหรับใช้พันขดลวดอาร์เมเจอร์
- คอมมิวเตเตอร์ ทำด้วยทองแดงออกแบบเป็นซี่ แต่ละซี่มีฉนวนไมก้า (Mica) คั่นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์ จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์เมเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์นี้อัดแน่นติดกับแกนเพลลาเป็นรูปกลมทรงกระบอก มีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่านเพื่อนำกระแสจากสายป้อนเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกับเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วนที่เกิดจากขดลวดขั้วแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้ว
- ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) เป็นขดลวดที่พันอยู่ในร่องสลอต (Slot) ของแกนอาร์เมเจอร์ ขนาดของลวดจะเล็กหรือใหญ่และจำนวนรอบจะมากหรือน้อย นั้นขึ้นอยู่กับารออกแบบตัวโรเตอร์ชนิดนั้นๆ เพื่อให้เหมาะสมกับงานต่างๆ ที่ต้องการ

2.4.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในมอเตอร์ กระแสจะแบ่งออกไป 2 ทางคือ ส่วนที่หนึ่งจะผ่านเข้าไปที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นและอีกส่วนจะผ่านแปรงถ่านคาร์บอนและคอมมิวเตเตอร์ เข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุน เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเช่นกัน ทั้งสองจะเกิดขึ้นขณะเดียวกันตามคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กแล้วสนามแม่เหล็กจะตัดกัน มีแต่การหักล้างและเสริมกัน ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดในอาร์เมเจอร์ ทำให้อาร์เมเจอร์หมุน เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเช่นกัน ทั้งสองสนามจะเกิดขึ้นขณะเดียวกันตามคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กแล้วสนามแม่เหล็กจะไม่ตัดกัน มีแต่การหักล้างและการเสริมกัน ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดในอาร์เมเจอร์ ทำให้อาร์เมเจอร์หมุน



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมดังรูปที่ 2.11 พบว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าดังสมการที่ (2.4.1)

$$V_c = V_a - I_a R_a - L \frac{dI_a}{dt} \quad (2.4.1)$$

และสมการสำหรับแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นสามารถหา T_d ได้ดังสมการที่ (2.4.2)

$$T_d = K_a \phi I_a \quad (2.4.2)$$

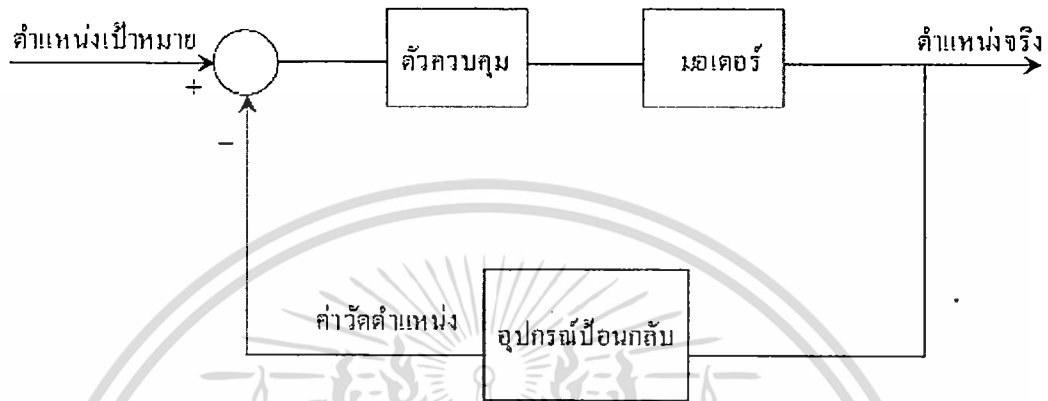
เมื่อ

- K_a คือ ค่าคงที่อาร์เมเจอร์
- ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก
- V_a คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- V_c คือ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์
- I_a คือ กระแสที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์
- R_a คือ ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์
- L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

2.4.3 การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่ง จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณอ้างอิงระบุตำแหน่งที่ต้องการและสัญญาณวัดตำแหน่งจริงที่ได้จากอุปกรณ์ป้อนกลับ สัญญาณผลต่างหรือสัญญาณคลาดเคลื่อนของสองสัญญาณที่ได้นี้ถูกป้อนเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุม หลังจากนั้นตัวควบคุมจะประมวลผล เพื่อกำหนดสัญญาณควบคุมส่งไปขับมอเตอร์ให้หมุนไปยังตำแหน่งที่

ต้องการ พบว่าหากตำแหน่งที่ต้องการ มีค่าเท่ากับตำแหน่งที่วัดได้ จากการอ่านค่าตำแหน่ง ป้อนกลับ สัญญาณคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือไม่มีสัญญาณควบคุมออกมาจากตัวควบคุม ทำให้มอเตอร์มีความเร็วเป็นศูนย์ โครงสร้างของระบบควบคุมตำแหน่งสามารถแสดงอย่างคร่าวๆ ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบควบคุมตำแหน่ง

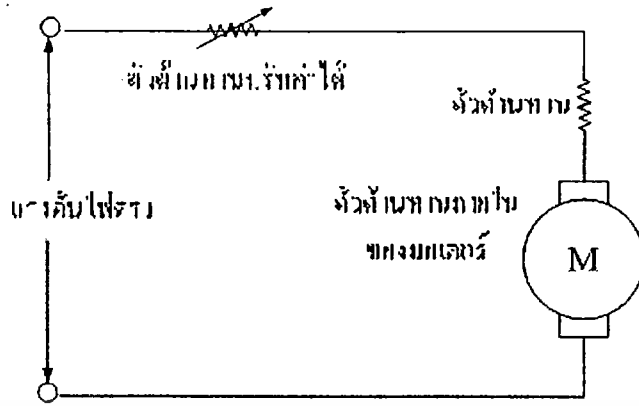
2.4.4 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขั้นพื้นฐาน

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขั้นพื้นฐาน สามารถแบ่งได้ดังนี้

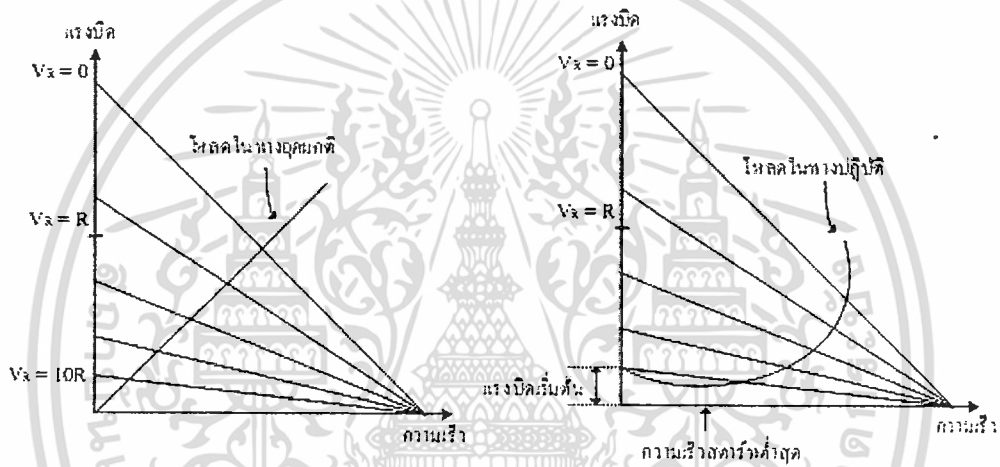
- การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้
- การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน
- การควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชัน

2.4.4.1 การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้

การหมุนตัวควบคุมต้านกลับปรับค่าได้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ออนุกรมกับมอเตอร์ โดยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ การบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะกำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทาน มักนิยมใช้กับมอเตอร์ตัวเล็กๆ การบังคับแบบนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ) แต่จะให้ความเร็วสูงมากเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในภาวะที่มีโหลดน้อยๆ ดังนั้นการบังคับแบบนี้มีประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้านคงที่



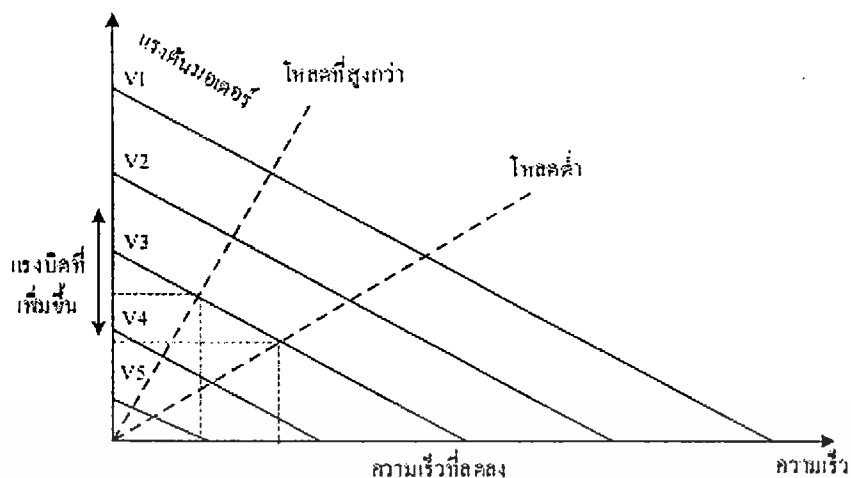
รูปที่ 2.13 วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2.14 กราฟคุณสมบัติการควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้

2.4.4.2 การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน

วิธีการนี้ดีกว่าวิธีการแรกแต่จะซับซ้อนกว่า ต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายกำลังสูงและมอเตอร์ถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ จากแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือ ถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิด แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็ว ส่วนข้อเสียของการควบคุมด้วยวิธีนี้คือ เมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำแรงดันที่ป้อนกลับให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน



รูปที่ 2.15 การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน

2.4.4.3 การควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน

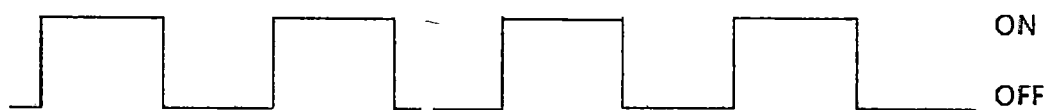
สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) คือการปรับความกว้างของพัลส์ โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน คือสัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณที่ใช้ปรับความกว้างของพัลส์ โดยอาศัยวงจรเปรียบเทียบแรงดันของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.16 สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันมีความกว้างพัลส์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์

เช่นจากรูปที่ 2.16 พบว่ามีดีวีตีไซเคิลเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ของคาบสัญญาณทั้งหมด คือการขับมอเตอร์ด้วยระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 10 เปอร์เซ็นต์ ของระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในวงจรขับ



รูปที่ 2.17 สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันมีความกว้างพัลส์เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์

หรือรูปที่ 2.17 พบว่าสัญญาณมีควิตีไซเคิลเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณคาบทั้งหมด คือ การขับมอเตอร์ด้วยระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 เปอร์เซ็นต์ ของระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในวงจรขับ

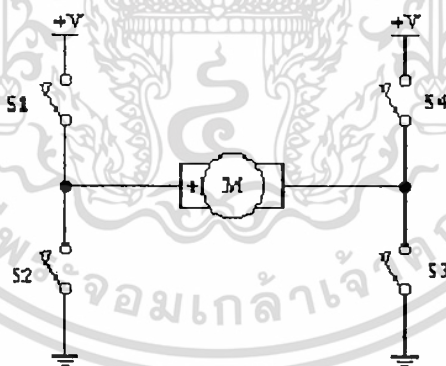


รูปที่ 2.18 สัญญาณพัลส์วิทมอดูละชันมีความกว้างพัลส์เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

หรือพบว่าสัญญาณมีควิตีไซเคิลเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณคาบทั้งหมด คือ การขับมอเตอร์ด้วยระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 90 เปอร์เซ็นต์ ของระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในวงจรขับ

2.4.5 การควบคุมทิศทางมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจร H-Bridge

การควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์กระแสตรงทำได้ โดยการควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งทำได้โดยการกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วของมอเตอร์ โดยควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ส่วนให้จะใช้วิธีการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า H-Bridge เข้ากับมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.19 มีหลักการทำงานพื้นฐานดังนี้



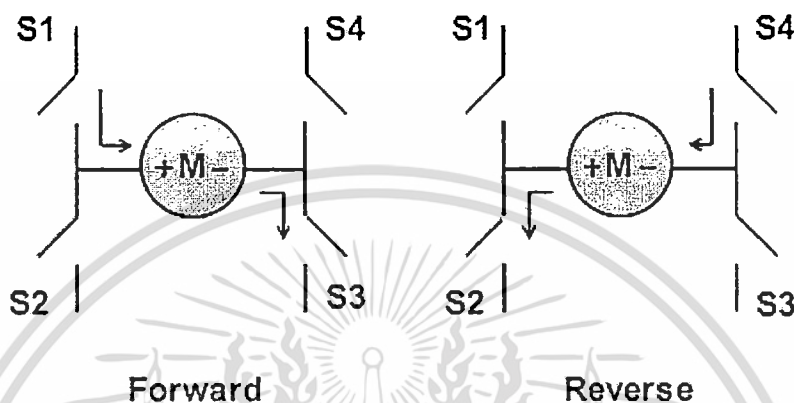
รูปที่ 2.19 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge

วงจรขับแบบ H-Bridge ประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัวคือ S1 S2 S3 และ S4 โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นภาระของวงจรในสภาวะเริ่มต้นสวิตช์ทุกตัวเปิดวงจรซึ่งทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์

เมื่อสวิตช์ S1 และ S3 ทำงานพร้อมกันวงจรจะเชื่อมกันทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วบวกของมอเตอร์ไปยังขั้วลบของมอเตอร์จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการพันขดลวดภายในมอเตอร์ ในทาง

กลับกันหากสวิตช์ S2 และ S4 ทำงานพร้อมกันก็จะเป็นการเชื่อมวงจรและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วลบของมอเตอร์ไปยังขั้วบวกของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้และเป็นการหมุนในทิศทางกลับกันกับทิศทางแรกดังแสดงในรูปที่ 2.20

โดยสรุป วงจรนี้จะใช้สวิตช์ 4 ตัวเพื่อบังคับการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์เพื่อขับให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่ต้องการโดยผลัดกันทำงานของสวิตช์ทีละ 2 ตัว พร้อมกัน



รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานเมื่อสับสวิตช์ในแต่ละคู่

2.5 ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุม

เนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพ การศึกษาทฤษฎีทางระบบควบคุมที่นำมาใช้ในการควบคุมเสถียรภาพให้แก่ระบบจึงสำคัญอย่างมาก จากการที่คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษา พบว่าเราสามารถเลือกใช้การออกแบบระบบควบคุมได้หลายแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี, วิธีโพล เพลซเมนต์, ตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น และพีชชี ลอจิก เป็นต้น ซึ่งในโครงการรถไฟฟ้าสองล้อแบบรักษาสถิตนี้ ผู้จัดทำเลือกใช้การควบคุมแบบพีไอดี (PID: Proportional plus Integral plus Derivative Control) ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่จะช่วยในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบ

ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control) เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมและแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ในหัวข้อนี้กล่าวถึงลักษณะที่นิยมใช้ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีกฎการควบคุม (Control Law) 3 รูปแบบหลักคือ

- การควบคุมแบบพี (P : Proportional Control)
- การควบคุมแบบไอ (I : Integral Control)
- การควบคุมแบบดี (D : Derivative Control)

2.5.1 ระบบควบคุมแบบพี

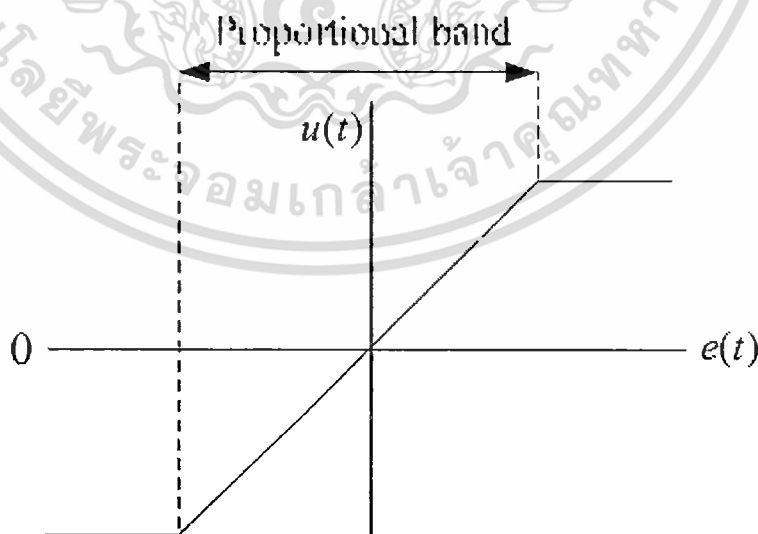
ในระบบควบคุมแบบพี เอาท์พุท $u(t)$ ของตัวควบคุม เป็นสัดส่วนกับอินพุท $e(t)$ ของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุทให้กับตัวควบคุมเป็นค่าความผิดพลาด $e(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังสมการที่ (2.5.1)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.5.1)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain) ซึ่งได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีค่าเป็นดังสมการที่ (2.5.2)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.5.2)$$

ดังนั้น การควบคุมด้วยตัวควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพี จึงเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาท์พุทที่มีขนาดใหญ่ในเวลา นั้น อย่างไรก็ตามการให้อัตราขยายคงที่นั้น ในทางปฏิบัติอาจกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น หรืออาจกำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าเอาท์พุทไม่น้อยกว่าค่าๆหนึ่ง และไม่มากเกินไปกว่าค่าๆหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุทมีลักษณะดังรูปที่ 2.21 ช่วงการกำหนดสัดส่วนแบบนี้ เรียกว่า Proportional Band

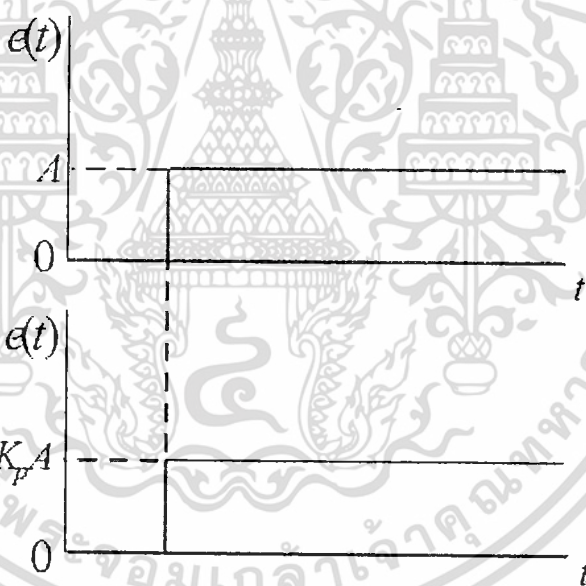


รูปที่ 2.21 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุท

การกำหนด Proportional Band แบบนี้ช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่อันต์ ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อตัวควบคุมมีเอาต์พุตที่เป็นไปได้ค่าหนึ่งก็นิยมกำหนดเอาต์พุตค่าใดๆเป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าเอาต์พุต 100% หมายความว่า เอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ดังสมการที่ (2.5.3)

$$K_p = \frac{100}{\text{Proportional Band}} \quad (2.5.3)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้นหากอินพุตมีสัญญาณเป็นสัญญาณระดับ (Step Signal) เอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับเช่นเดียวกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่งตามรูปที่ 2.22 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของตัวควบคุม เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง Proportional Band

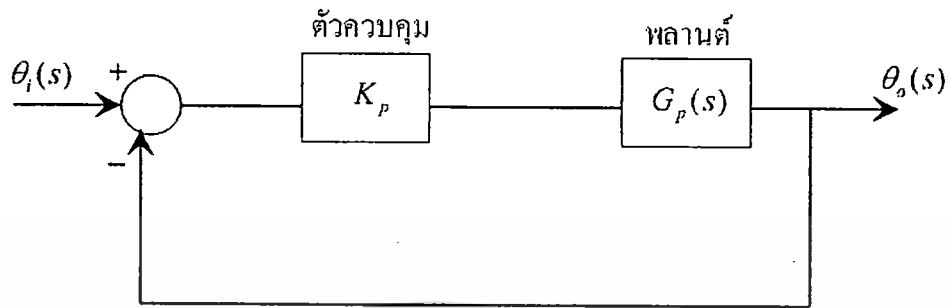


รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบพีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น กาน มีลักษณะของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดดังสมการที่ (2.5.4)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = K_p G_p(s) \quad (2.5.4)$$

เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์ (Plant) หรือกระบวนการ (Process)



รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี

ข้อเสียของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี คือ ถ้ากระบวนการเป็นชนิด 0 (Type 0) ตัวควบคุมจะไม่เปลี่ยนแปลงชนิด ทำให้ระบบเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady-State Error) ต่ออินพุตระดับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด ดังสมการที่ (2.5.5)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.5.5)$$

มีสมการคุณลักษณะเป็น $1 + K_p G_p(s) = 0$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่า K_p เท่านั้น

2.5.2 ระบบควบคุมแบบไอ

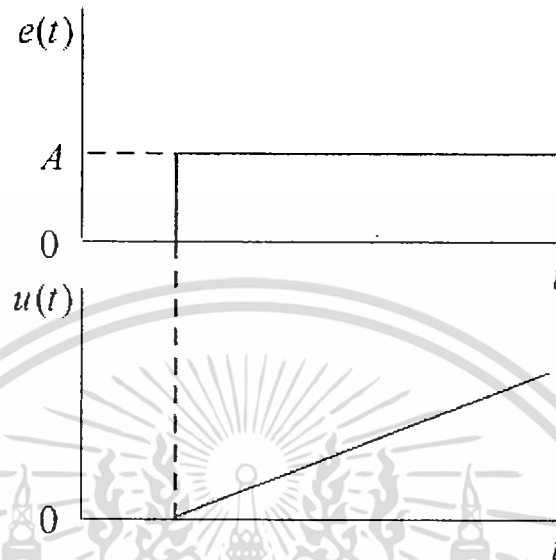
ในระบบควบคุมแบบไอ เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบไอเป็นสัดส่วนกับการอินทิกรัลสัญญาณของค่าผิดพลาดเทียบกับเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (2.5.6)

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.5.6)$$

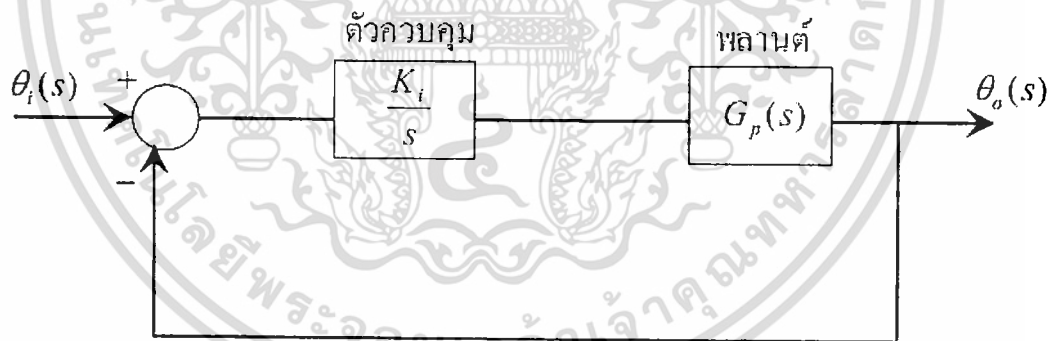
เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่ที่เรียกว่า อัตราขยายอินทิกรัล (Integral Gain) มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹

การตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับขนาด A ณ เวลาใดๆ แสดงดังรูปที่ 2.24 ซึ่งเอาท์พุท $u(t)$ จะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุตคูณด้วย

อัตราขยายอินทิกรัล ดังนั้นหากมีค่าอินพุตแบบระดับ เอาท์พุตที่ออกจากตัวควบคุมมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆด้วยอัตราคงที่ในลักษณะรูปสัญญาณลาดเอียง (Ramp Signal)



รูปที่ 2.24 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ



รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบไอ

จากสมการที่ (2.5.6) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบไอ ดังสมการ (2.5.7)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.5.7)$$

ทำให้ระบบควบคุมที่แสดงในรูปที่ 2.25 มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดดังสมการที่ (2.5.8)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_i}{s} G_p(s) \quad (2.5.8)$$

และทำให้มีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ 2.5.9

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{\frac{K_i G_p(s)}{s}}{1 + \frac{K_i G_p(s)}{s}} \quad (2.5.9)$$

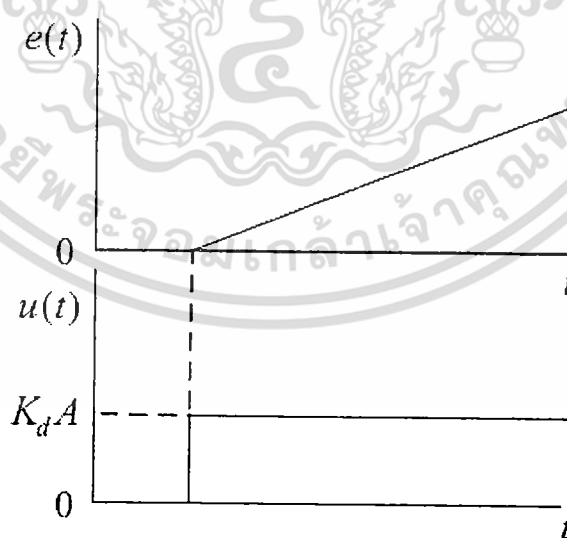
จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด หาก $G_p(s)$ เดิมเป็นชนิด 0 (Type 0) จะพบว่าระบบควบคุมแบบโอทำให้ระบบวงเปิดซึ่งมีตัวควบคุมแล้ว $G_c(s)G_p(s)$ เป็นชนิด 1 (Type 1) ซึ่งสามารถทำให้ระบบควบคุมวงปิดไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบระดับ

2.5.3 ระบบควบคุมแบบดี

ระบบควบคุมแบบดี เอาท์พุตเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดเทียบกับเวลา ดังสมการที่(2.5.10)

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5.10)$$

เมื่อ K_d คืออัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative Gain) มีหน่วยเป็นวินาที



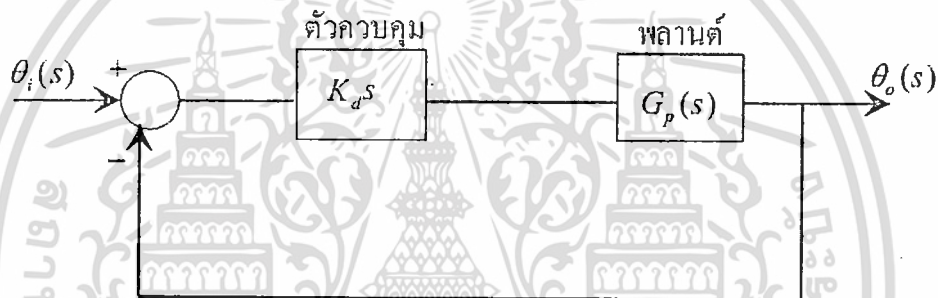
รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี

การตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบลาดเอียงด้วยความชัน A แสดงดังรูปที่ 2.26 จากสมการที่ (2.5.10) พบว่าตัวควบคุมแบบดีจะให้สัญญาณออกมีค่ามากเมื่ออินพุตความผิดพลาดมีแนวโน้มในอัตราที่สูงขึ้นก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดมากขึ้น ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบดี แสดงดังสมการที่ (2.5.11)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.5.11)$$

ดังนั้นระบบควบคุมแบบดีจึงมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด ดังสมการที่ (2.5.12)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \quad (2.5.12)$$



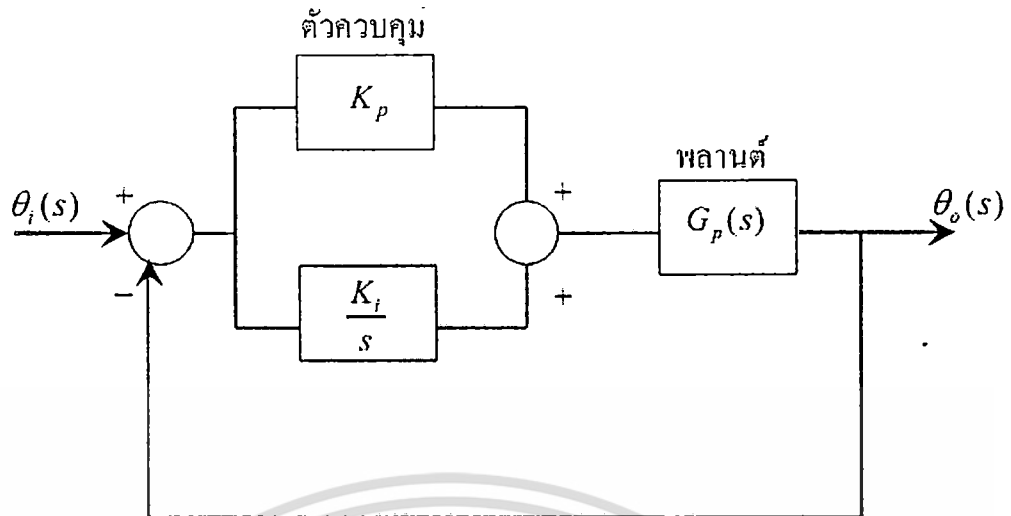
รูปที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบดี

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบดี ในสมการที่ (2.5.11) จะเห็นว่าหากพลาเน็ตเป็นแบบชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบดีจะไปลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไม่ก็ตามตัวควบคุมแบบดี ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ในทางปฏิบัติการนำการควบคุมแบบดีไปใช้งานค่อนข้างลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะประมาณการควบคุมแบบดีโดยใช้ตัวชดเชยแบบมุนนำ (Lead Compensator)

2.5.4 ระบบควบคุมแบบพีไอ

การที่ระบบควบคุมมีเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบไอ สามารถแก้ไขได้ในระดับหนึ่ง โดยใช้การควบคุมแบบพีร่วมกับไอ เรียกว่าการควบคุมแบบพีไอ (PI: Proportional plus Integral Control) ซึ่งมีลักษณะของระบบควบคุมเป็นดังรูปที่ 2.28

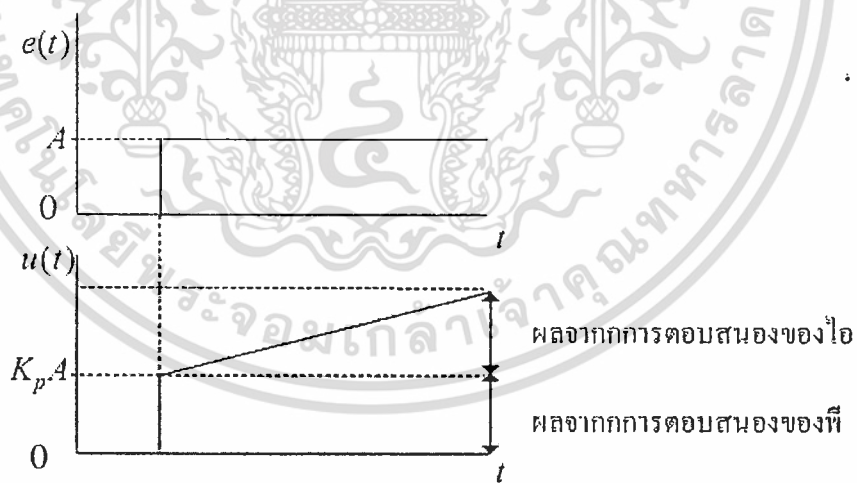


รูปที่ 2.28 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ

และมีเอาต์พุตของตัวควบคุมดังสมการที่ (2.5.13)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^1 e(t) \tag{2.5.13}$$

โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อได้รับอินพุตแบบระดับขนาด A แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.29 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากสมการที่(2.5.13) ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอดังสมการที่ (2.5.14)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$$= \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{s} \quad (2.5.14)$$

โดยหากนิยามค่าเวลาคงตัวอินทิกรัล (Integral Time Constant) $\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$ จะสามารถจัดรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอได้ดังสมการที่ (2.5.15)

$$G_c(s) = \frac{K_p(s + \frac{1}{\tau_i})}{s} \quad (2.5.15)$$

และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดเป็นดังสมการที่(2.5.16)

$$\begin{aligned} G(s) &= G_c(s)G_p(s) \\ &= \frac{K_p(s + \frac{1}{\tau_i})}{s} G_p(s) \end{aligned} \quad (2.5.16)$$

พบว่าจะเพิ่มซีโร $s = -1/\tau_i$ และโพล ที่ $s = 0$ ดังนั้นจึงเพิ่มชนิดของระบบขึ้นไป 1 ทำให้ระบบควบคุมพีไอไม่มีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวต่ออินพุตแบบระดับ และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (2.5.17)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_p(s + \frac{1}{\tau_i})G_p(s)}{s + K_p(s + \frac{1}{\tau_i})G_p(s)} \quad (2.5.17)$$

2.5.5 ระบบควบคุมแบบพีดี

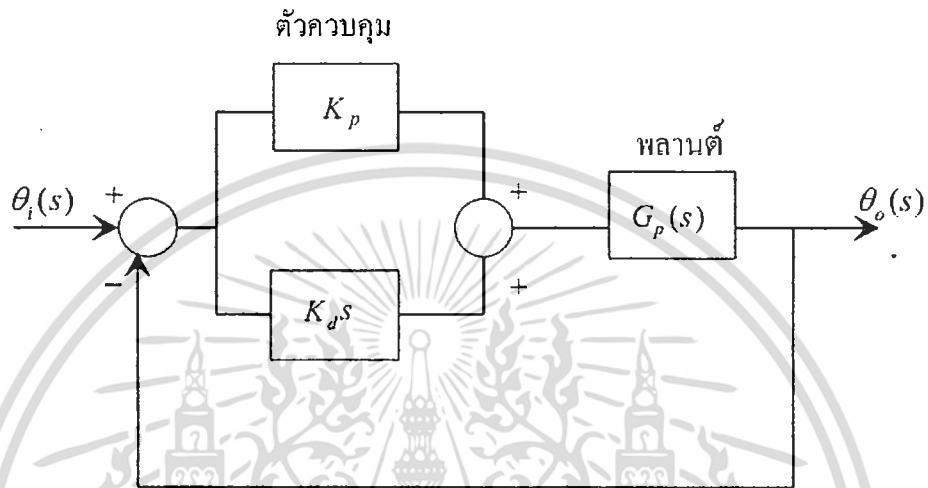
การควบคุมแบบพีดีรวมกับการควบคุมแบบดี หรือที่เรียกว่าการควบคุมแบบพีดี (PD: Proportional plus Derivative Control) มีลักษณะดังรูปที่ 2.30 จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดดังสมการที่ (2.5.18)

$$\begin{aligned} G(s) &= (K_p + K_d s)G_p(s) \\ &= K_p(1 + \tau_d s)G_p(s) \end{aligned} \quad (2.5.18)$$

และจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (2.5.19)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_p[1+(\tau_d s)G_p(s)]}{1+K_p[1+(\tau_d s)G_p(s)]} \quad (2.5.19)$$

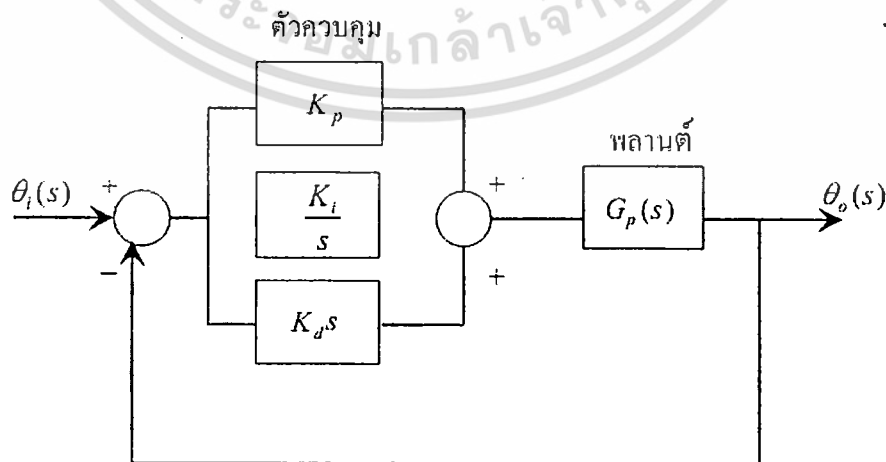
เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ ค่าคงตัวอนุพันธ์ (Derivative Time Constant) ซึ่งการควบคุมนี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่ $s = -\tau_d$ และไม่มี การเปลี่ยนแปลงชนิดของระบบ ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวยังมีอยู่



รูปที่ 2.30 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีดี

2.5.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

การควบคุมแบบพีไอดี (PID: Proportional plus Integral plus Derivative Control) อาศัย ตัวควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอร่วมกับแบบดี ซึ่งอาจเรียกว่าการควบคุมแบบ 3 เทอม (Three - Term Control) โดยระบบควบคุมมีลักษณะดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

จะได้เอาที่พูดของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด $e(t)$ ดังสมการที่ (2.5.20)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5.20)$$

เพราะฉะนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมจะเป็นดังสมการที่ (2.5.21)

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \\ &= K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \end{aligned} \quad (2.5.21)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงจรมีการเปิดของระบบควบคุมแบบพีไอดี คือ

$$\begin{aligned} G(s) &= G_c(s) G_p(s) \\ &= K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s) \\ &= \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \end{aligned} \quad (2.5.22)$$

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเป็นดังสมการที่ (2.5.23)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_p (1 + \tau_i s + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s + K_p (1 + \tau_i s + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)} \quad (2.5.23)$$

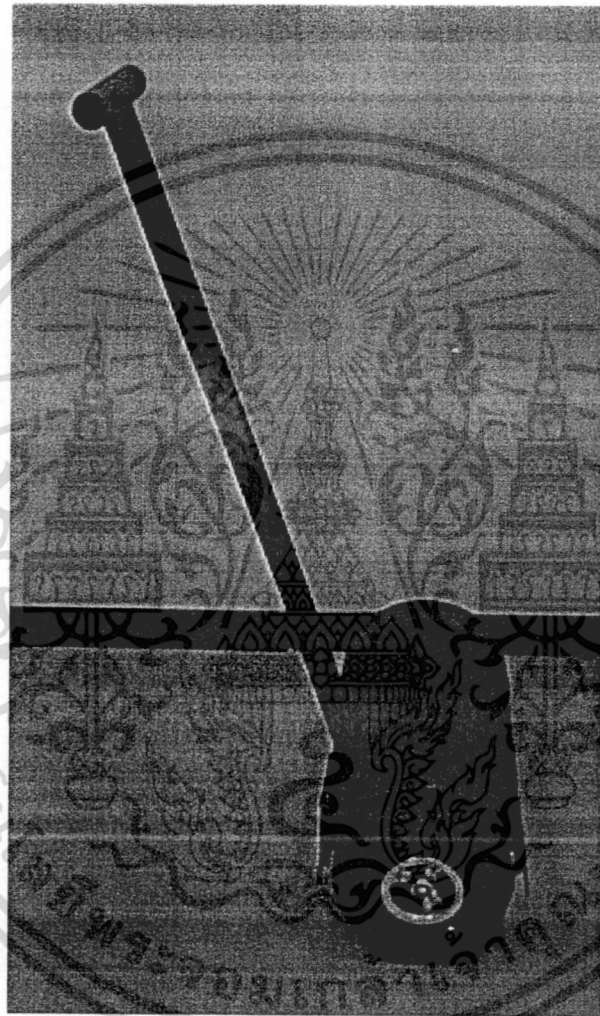
เนื่องจากการการควบคุมแบบพีดี จะเพิ่มจำนวนขีโรว์ให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัว และเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัว และทำให้ชนิดของระบบเพิ่มขึ้น 1 ดังนั้นความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวจะมีค่าเท่ากับศูนย์

บทที่ 3

การออกแบบและการทำงาน

3.1 โครงสร้างของตัวรถ

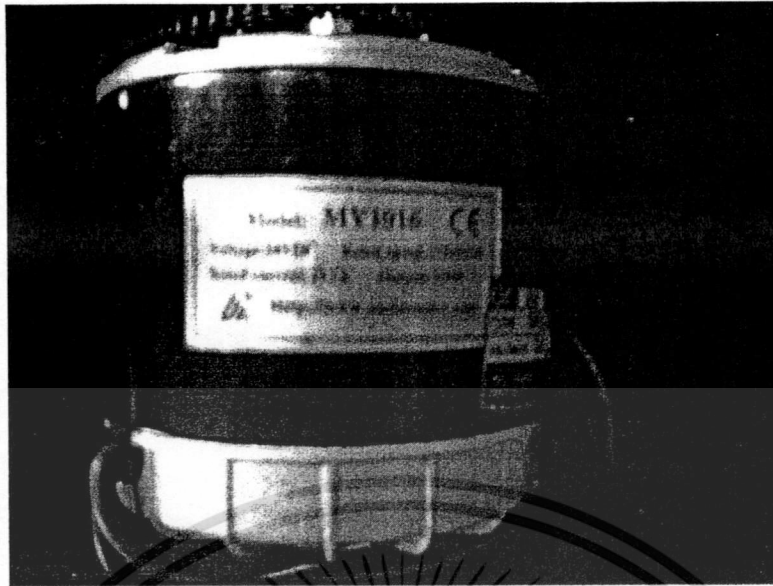
ตัวรถเมื่อประกอบเสร็จจะมีรูปร่างดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 ตัวรถที่สร้างเสร็จแล้ว

3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อน

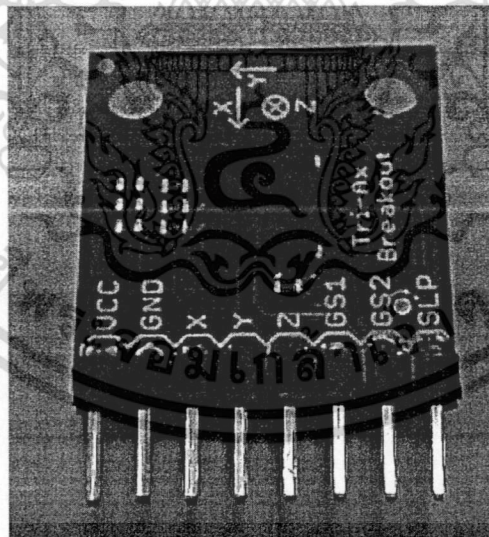
มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ที่ซึ่ในรถไฟฟ้่าที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปดังรูปที่ 3.2 เป็นมอเตอร์ขนาด 24 V 350 W ใช้ระบบโซ่ในการส่งกำลังไปยังล้อ



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้า

3.3 ระบบตรวจจับความเร่ง

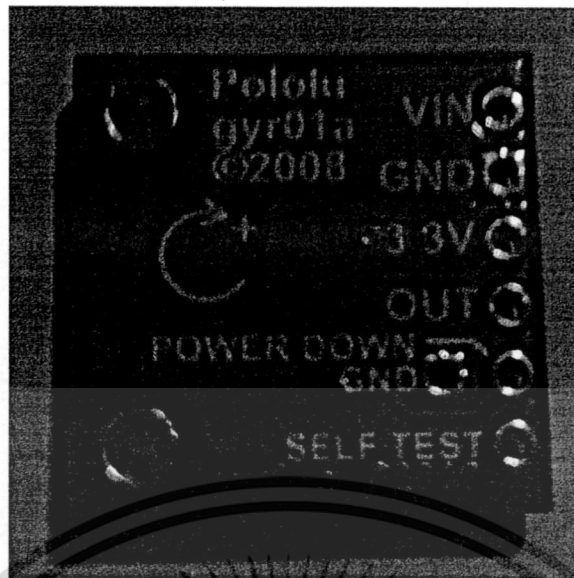
ระบบตรวจจับความเร่งใช้ ไอซี เบอร์ MMA7260Q มีความไวในการตรวจวัดความเร่ง 1.5 G 2.0G 4.0G และ 6.0G ตามลำดับ ซึ่งสามารถเลือกความไวได้ ในโครงการนี้เลือกใช้ความไวที่ 1.5 G และใช้ไฟเลี้ยง 3 โวลต์ วงจรตรวจจับความเร่งแสดงในรูปที่ 3.3 มีประโยชน์เพื่อใช้ในการวัดมุมเฉลี่ยของตัวรถในขณะนั้นเพื่อกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวรถ



รูปที่ 3.3 แผงวงจรตรวจจับความเร่ง

3.4 ระบบตรวจจับอัตราการหมุน

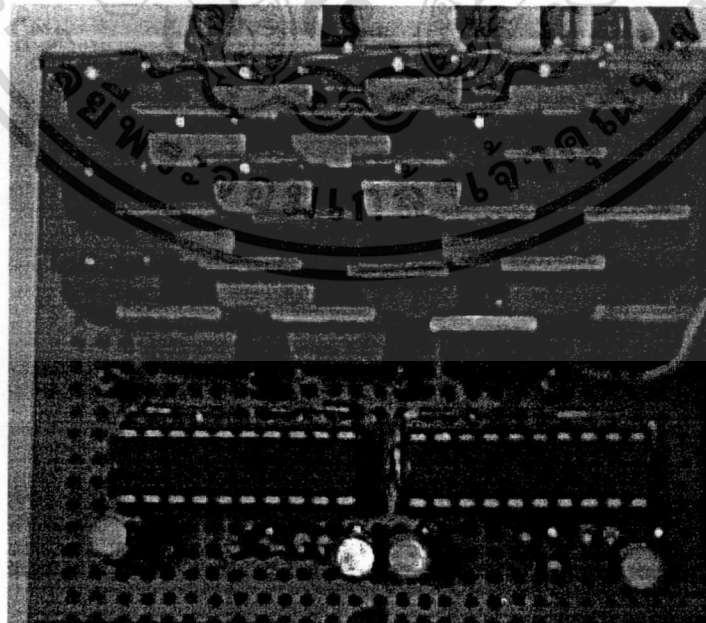
ระบบตรวจจับอัตราการหมุนใช้ไอซี เบอร์ LISY300AL ใช้ไฟเลี้ยง 2.7–3.6 V สามารถตรวจจับความเร็วเชิงมุมได้ ± 300 องศาต่อวินาที โดยให้สัญญาณออกเป็นแรงดัน



รูปที่ 3.4 แผงวงจรตรวจวัดอัตราการหมุน

3.5 วงจรขับมอเตอร์

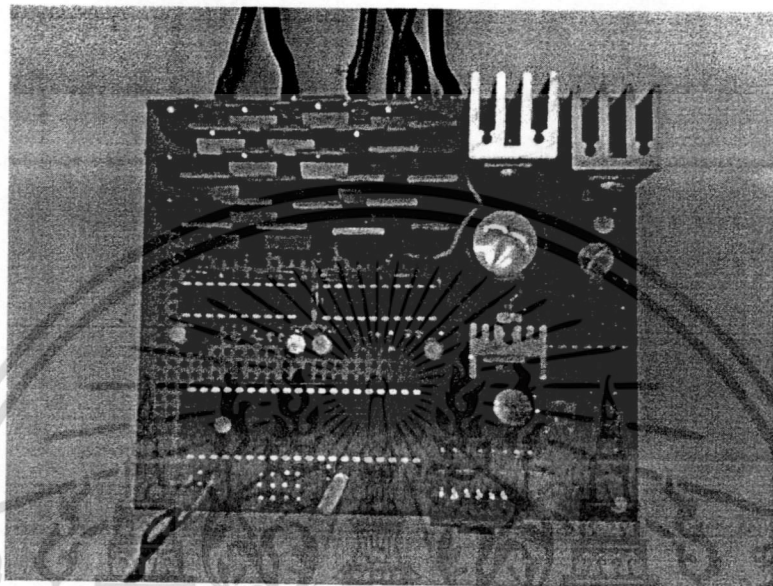
ใช้ไอซีเบอร์ HIP4080A ทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A เพื่อขับมอเตอร์ทั้งสองตัว โดย HIP4080A จะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณเข้าขาเกตของ วงจรมอสเฟสที่ต่อควบคุมมอเตอร์แบบ H-BRIDGE ทำให้สามารถขับมอเตอร์หมุนได้ทั้ง 2 ทิศทาง โดยคำสั่งที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะมี 2 สัญญาณ ได้แก่ 1 สัญญาณ PWM เพื่อควบคุม พลังงานที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ 2. สัญญาณกำหนดทิศทางการหมุน เพื่อควบคุมการเดินหน้าและถอย หลังของตัวรถ รูปที่ 3.5 แสดงวงจรขับมอเตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรขับมอเตอร์

3.6 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่การรับข้อมูลจากวงจรตรวจวัดต่างๆ แล้วนำมาประมวลผลเพื่อส่งไปควบคุมมอเตอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877A ทั้งนี้เพราะสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาดและนิยมกันทั่วไป

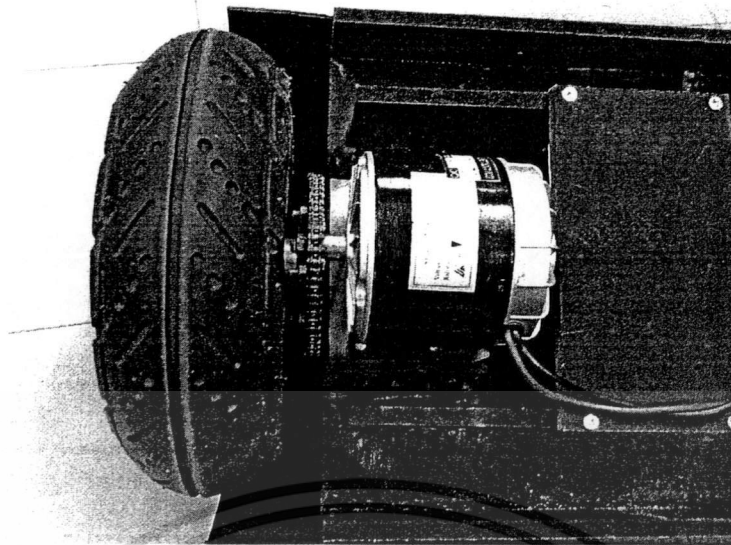


รูปที่ 3.6 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

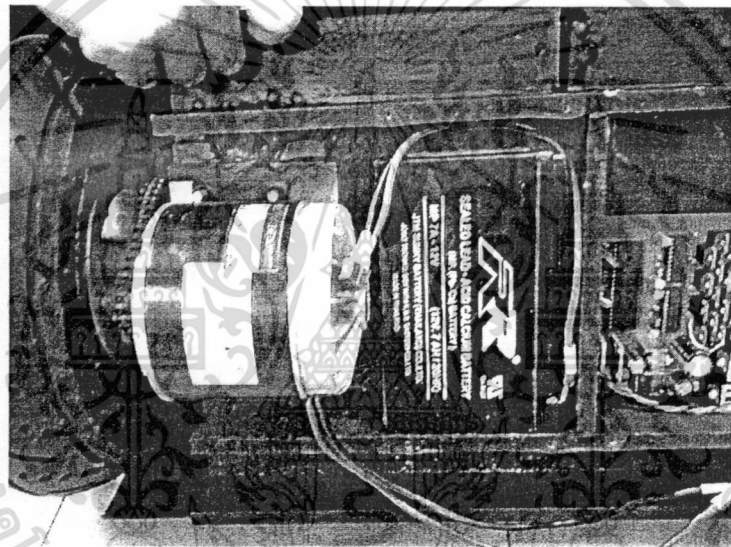
3.7 ตัวรถ

ตัวรถถูกออกแบบให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มอเตอร์และล้อจะถูกประกอบลงบนแท่นที่มีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร หนาประมาณ 3 เซนติเมตร ซึ่งในส่วนนี้ก็จะถูกใช้เป็นที่ยืนของผู้ใช้งานด้วยเช่นกัน ส่วนมอเตอร์ทั้งสองอยู่ด้านล่างใต้แท่นยืนของผู้ใช้ ในขณะที่ช่องว่างระหว่างมอเตอร์ จะใช้เป็นที่เก็บแบตเตอรี่ และ วงจรควบคุมทั้งหมด ส่วนแท่นจับนั้นจะอยู่ด้านบนซึ่งตั้งในลักษณะเอียงทำมุมเล็กน้อยเพื่อให้มือจับอยู่ห่างผู้ใช้ในระยะที่ช่วยให้ควบคุมรถได้สะดวก

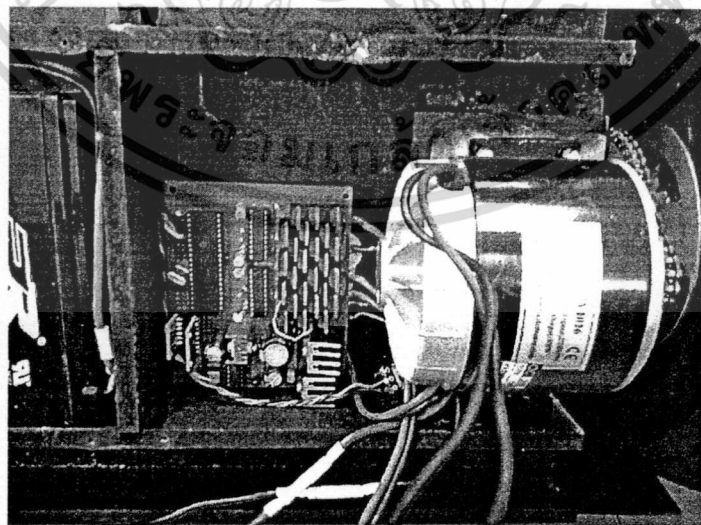
รูปที่ 3.7 – 3. ... แสดงส่วนต่างๆ ของตัวรถ



รูปที่ 3.7 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ได้ฐาน



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งแบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งวงจรที่ใช้ควบคุมรถ