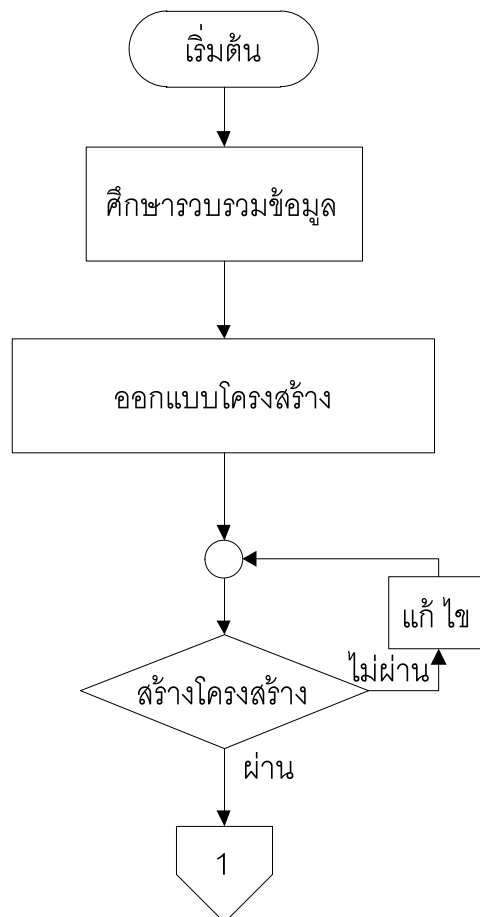


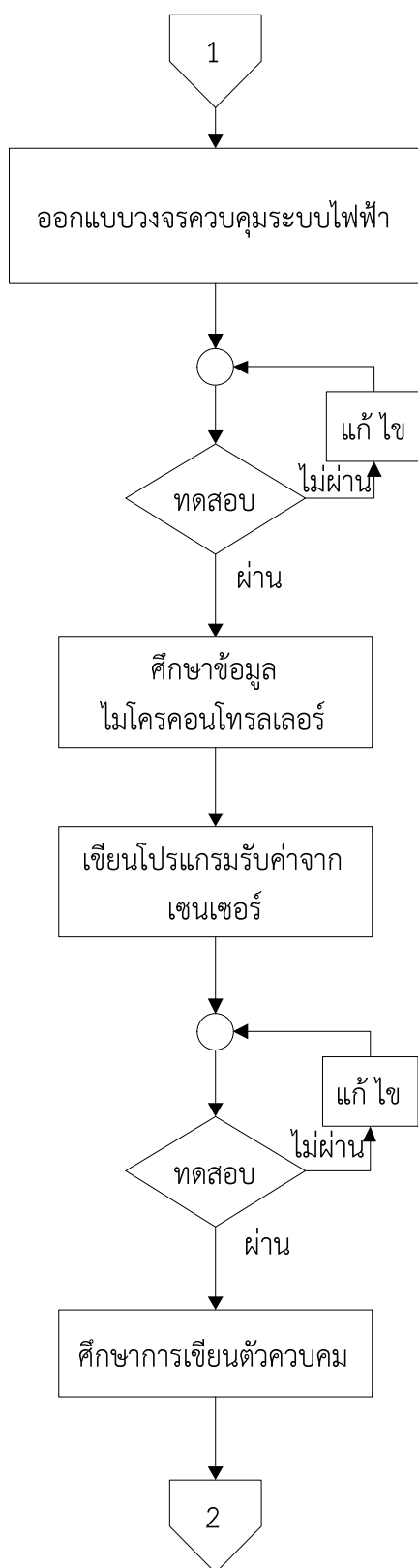
บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

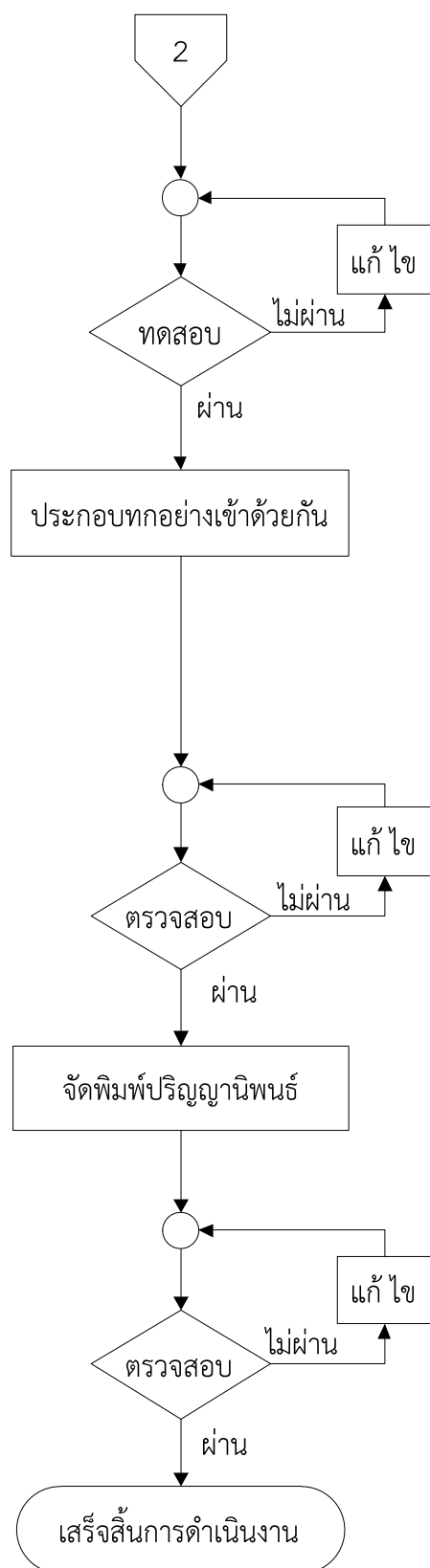
การดำเนินงานนั้นจำเป็นต้องวางแผนการดำเนินงาน เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการทำงาน และยังเป็นการตรวจสอบว่าทำงานช้าหรือเร็วเกินไปเพื่อที่จะจัดการกับเวลาให้ลงตัวเหมาะสมกับการดำเนินงาน โดยที่ทำงานที่ออกมา นั้นสมบูรณ์ที่สุด ในการดำเนินงานของโครงการนี้มีแผนภูมิการทำงานโครงการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิการทำงานโครงการ



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิการทำโครงการ (ต่อ)



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิการทำงาน (ต่อ)

ขั้นตอนในการดำเนินงาน สามารถแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้

- 3.1 การศึกษาข้อมูล
- 3.2 การเลือกใช้งานมอเตอร์
- 3.3 การเลือกอุปกรณ์ในการทำโครงงาน
 - 3.3.1 การเลือกชุดขับกำลังมอเตอร์
 - 3.3.2 การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 3.3.3 การเลือกใช้เซนเซอร์วัดค่ามุม
- 3.4 การจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงาน
 - 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน
 - 3.4.2 งบประมาณที่ใช้ในการทำโครงงาน
- 3.5 การออกแบบโครงสร้าง
- 3.6 การรับค่าเซนเซอร์
 - 3.6.1 การรับค่าเซนเซอร์วัดความเร่ง
 - 3.6.2 การรับค่าเซนเซอร์วัดความเอียง
- 3.7 การรวมสัญญาณค่าเซนเซอร์ด้วยสมการKalman Filter
- 3.8 การเขียนตัวควบคุมแบบPID Control ควบคุมการทำงาน
 - 3.8.1 วิธีการในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบPID Control
- 3.9 การเขียนตัวควบคุมแบบFuzzy logic control ควบคุมการทำงาน
 - 3.9.1 การจัดค่าความเป็นสมาชิก
 - 3.9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต
 - 3.9.3 กฎตัวควบคุมแบบFuzzy logic control
- 3.10 แผนการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาข้อมูล

ผู้จัดทำโครงการได้ทำการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เรียงตามลำดับ ดังนี้

3.1.1 ระบบสมองกลฝังตัว

3.1.2 เซนเซอร์วัดค่ามุม

3.1.2.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง

3.1.2.2 เซนเซอร์วัดความเอียง

3.1.3 สมการKalman Filter

3.1.4 วงจรขับกำลังมอเตอร์

3.1.5 ตัวควบคุมแบบPID Control

3.1.6 ตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

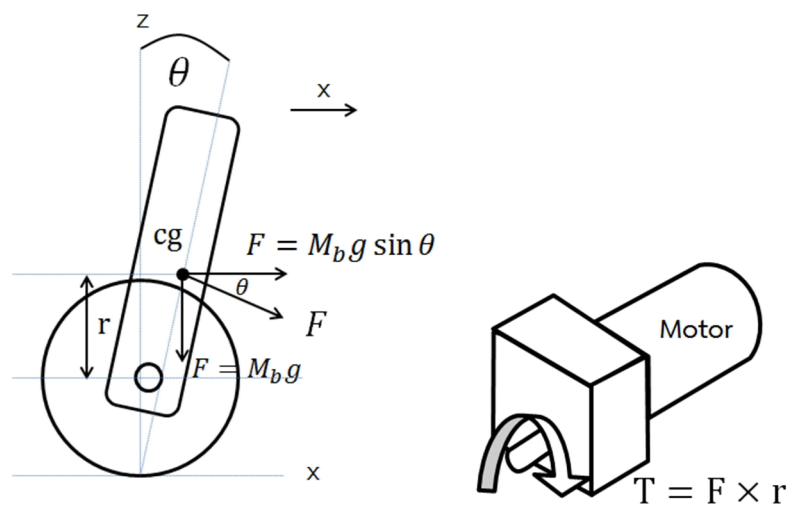
3.1.7 ทฤษฎีโมเมนต์และการรักษาสมดุลของแรง

3.1.8 ทฤษฎีการรักษาสมดุลของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง

ซึ่งเนื้อหาจะกล่าวถึงดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 ของการจัดทำแล้ว

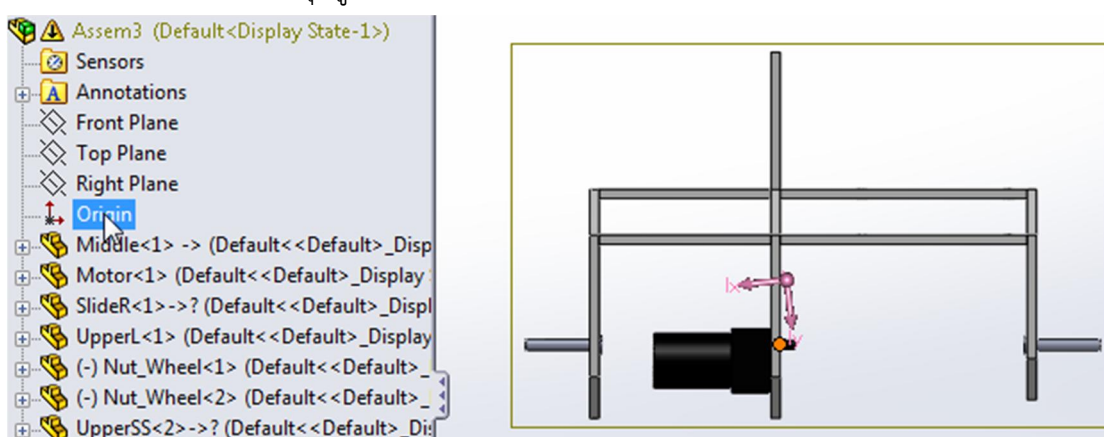
3.2 การเลือกใช้งานมอเตอร์

ในการเลือกใช้งานมอเตอร์นั้นจะต้องเลือกมอเตอร์ที่สามารถกลับทางหมุนได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถกลับทางหมุนได้รวดเร็ว แต่ในการที่จะเลือกมอเตอร์ตัวไหนที่ใช้ได้นั้น จะต้องพิจารณาจากค่าของแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์เปรียบเทียบกับแรงบิดที่ต้องการใช้งานเพื่อรักษาสมดุล โดยแรงบิดที่ต้องการเกิดจากแรงของน้ำหนักระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงคูณกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกคูณกับค่าของมุมที่ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงกระทำในแนวตั้งคูณกับความห่างระหว่างเพลามอเตอร์กับจุดศูนย์กลางของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง โดยแรงที่กระทำต่อระบบที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3.2 แรงที่กระทำต่อระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง

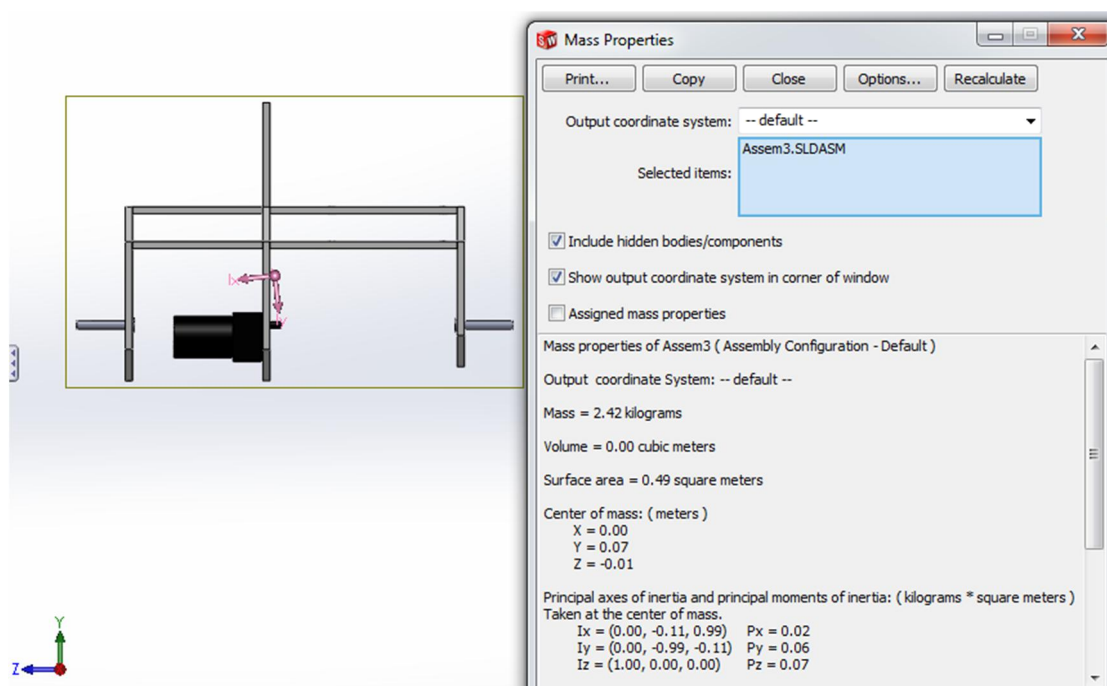


ภาพที่ 3.2 แรงที่กระทำต่อระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรง

จากภาพที่ 3.2 การหาค่าแรงบิดที่ต้องการใช้งานของมอเตอร์ จำเป็นต้องทราบถึงระยะระหว่างเพลามอเตอร์กับจุดศูนย์กลางของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรง แต่อุปกรณ์ที่นำมาประกอบในแต่ละชิ้นมีรูปร่างและน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน ทำให้การหาจุดศูนย์กลางจำเป็นต้องหาจากจุดศูนย์กลางอุปกรณ์แต่ละชิ้นเพื่อนำมาคำนวณหาจุดศูนย์กลางน้ำหนักใหม่ ซึ่งการหาค่าจากวิธีการคำนวณมีความยุ่งยากมาก แต่ในที่นี้จะใช้วิธีการคำนวณจากโปรแกรมโซลิดเวิร์ก(Solid Work) ซึ่งมีความแม่นยำและสะดวกต่อการใช้งาน โดยการหาระยะระหว่างเพลามอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรง จะกำหนดให้จุดเริ่มต้นของการออกแบบอยู่ที่เพลามอเตอร์ดังภาพที่ 3.3 และจุดศูนย์กลางของน้ำหนักที่ได้มาจากโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 จุดเริ่มต้นของการวาดภาพบนโปรแกรมโซลิดเวิร์ก



ภาพที่ 3.4 ระยะระหว่างจุดเริ่มต้นถึงจุดศูนย์กลางน้ำหนักบนโปรแกรมโซลิดเวิร์ก

โดยในที่นี้จะสมมุติว่ามุมที่ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวสามารถรักษาสสมดุลแนวตรง จะเลือกใช้มุมที่กำหนดไว้ตามขอบเขตคือมุม ± 5 องศา ซึ่งเมื่อได้ค่าของตัวแปรครบทั้งหมดแล้ว สามารถหาแรงบิดที่ต้องการรักษาสสมดุลได้ดังนี้

$$T_L = F \times r \quad (3-1)$$

โดยที่

T_L คือ แรงบิดที่ต้องการ มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.m)

F คือ แรงกระทำของระบบขับเคลื่อนล้อเดียว มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

r คือ ระยะเพลามอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางของหนัก มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ซึ่งแรงกระทำของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวหาได้จากสูตรดังนี้

$$F = M_b g \sin \theta \quad (3-2)$$

โดยที่

M_b คือ น้ำหนักของโครงสร้าง มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (Kg)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น เมตร/วินาทีกำลังสอง (m/s^2)

โดยเมื่อแทนค่าต่างๆที่ได้ลงในสมการแล้วจะได้ดังนี้

$$T_L = 2.47 \times 9.8 \sin 5 \times 0.7 = 1.47 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โดยที่มอเตอร์ที่มีให้เลือกใช้มีจำนวนรอบ 5000 รอบ 100 วัตต์เมื่อพิจารณาถึงแรงบิดที่มอเตอร์สามารถทำได้โดยใช้สูตรหาแรงบิดดังนี้

$$T_m = \frac{P \times 60}{2\pi \times n} \quad (3-3)$$

โดยที่

T_m คือ แรงบิดที่มอเตอร์ทำได้สูงสุด มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.m)

P คือ กำลังมอเตอร์ มีหน่วยเป็น วัตต์ (watt)

n คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์สูงสุด มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

โดยเมื่อแทนค่าต่างๆที่ได้ลงในสมการแล้วจะได้ดังนี้

$$T_m = \frac{100 \times 60}{2\pi \times 5000} = 0.190 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

เมื่อพิจารณาแล้วแรงบิดที่มอเตอร์ทำได้สูงสุดเปรียบเทียบกับแรงบิดที่ต้องการ ยังไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากมอเตอร์ทำแรงบิดได้สูงสุดน้อยกว่าแรงบิดที่ต้องการ แต่มอเตอร์ที่นำมาใช้งานมีเกียร์ทดติดมากับมอเตอร์ด้วย โดยสูตรการหาขนาดแรงบิดเมื่อเพิ่มอัตราเกียร์ทดสามารถหาได้จากสูตรดังนี้

$$\frac{n_m}{n_G} = \frac{T_G}{T_m} \quad (3-4)$$

โดยที่

n_m คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

n_G คือ ความเร็วรอบของปลายเกียร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

T_G คือ แรงบิดที่ปลายเกียร์ มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.m)

T_m คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.m)

เมื่ออัตราความเร็วรอบของมอเตอร์ 5000 รอบต่อวินาที แต่อัตราทดเกียร์ทำให้ความเร็วรอบปลายเกียร์มีค่าเท่ากับ 500 รอบต่อวินาที ดังนั้นแรงบิดที่ปลายเกียร์หาได้จากสูตรดังนี้

$$T_G = \frac{n_m}{n_G} \times T_m \quad (3-5)$$

โดยที่

n_m คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

n_G คือ ความเร็วรอบของปลายเกียร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

T_m คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N.m)

โดยเมื่อแทนค่าต่างๆที่ได้ลงในสมการแล้วจะได้ดังนี้

$$T_G = \frac{5000}{500} \times 0.19 = 1.90 \text{ นิวตัน.เมตร}$$

ดังนั้นแรงบิดที่ปลายมอเตอร์จะต้องมีค่ามากกว่าแรงบิดที่ใช้งาน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันได้ดังนี้

$$T_G \geq T_L \quad (3-6)$$

โดยที่

T_G คือ แรงบิดที่ปลายเกียร์ มีหน่วยเป็น นิวตัน.เมตร (N.m)

T_L คือ แรงบิดที่ต้องการ มีหน่วยเป็น นิวตัน.เมตร (N.m)

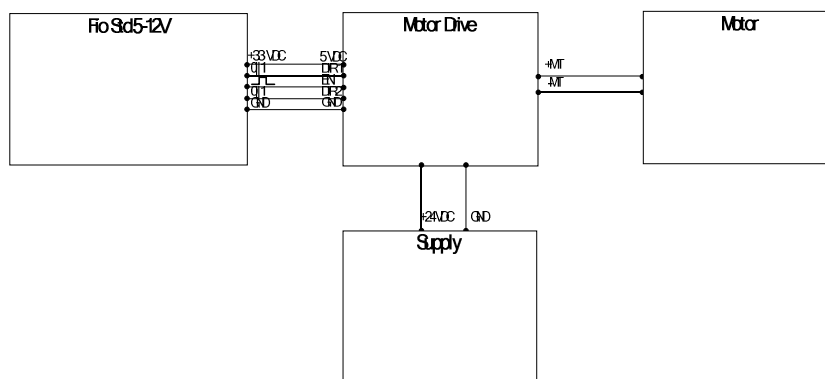
ดังนั้น เมื่อค่าของแรงบิดที่ปลายมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.90 ซึ่งมากกว่าแรงบิดที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.47 ดังนั้น มอเตอร์ที่เลือกใช้สามารถนำไปใช้งานได้

3.3 การเลือกอุปกรณ์ในการทำโครงงาน

เมื่อทราบถึงมอเตอร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้แล้ว จากนั้นจะต้องพิจารณาถึงอุปกรณ์อื่นๆที่นำไปใช้กับระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงดังต่อไปนี้

3.3.1 การเลือกใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

เมื่อพิจารณาขนาดของมอเตอร์ที่เลือกใช้งานแล้ว มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 วัตต์ มอเตอร์กินแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ดังนั้นมอเตอร์กินกำลังไฟฟ้าเพียง 8.3 แอมแปร์ ซึ่งชุดขับเคลื่อนมอเตอร์นี้เป็นชุดขับเคลื่อนสำเร็จรูปของบริษัท อีทีที จำกัดสามารถทนกระแสได้สูงสุด 10 แอมแปร์ ซึ่งชุดขับเคลื่อนสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ และควบคุมการหมุนกลับทิศทางได้รวดเร็วและการเบรกของมอเตอร์ด้วยวิธีการใช้ลอจิกคอนโทรลที่รองรับสัญญาณของชุดกำลังจำนวน 3 เส้น และมีไฟเลี้ยงและกราวด์ รวมทั้งหมด 5 เส้นโดยวงจรจะต่อดังภาพที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าควบคุมชุดขับเคลื่อนกำลังของมอเตอร์

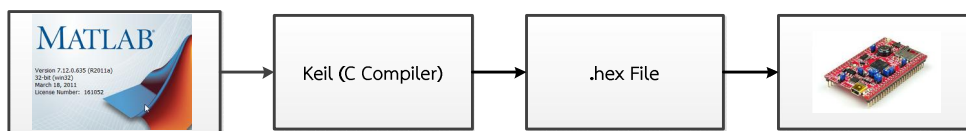


ภาพที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าควบคุมชุดขับเคลื่อนกำลังของมอเตอร์

โดยการใช้งานของชุดขับกำลังมอเตอร์จะกล่าวไว้ภายในบทที่ 2 ของการจัดทำแล้ว

3.3.2 การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้เกิดความง่ายของการเขียนโปรแกรมผู้จัดทำได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Fio Standard ซึ่งวิธีในการสร้างโค้ดโปรแกรมสามารถสร้างด้วยโปรแกรม MATLAB™ ทั้งหมด โดยการสร้างโค้ดบนโปรแกรม MATLAB™ เริ่มต้นเมื่อเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วโปรแกรม MATLAB™ จะสร้างโค้ดที่เป็นภาษาซี ต่อจากนั้นโปรแกรม MATLAB™ จะส่งโค้ดภาษาซีผ่าน C Compiler ตัวหนึ่งมีชื่อเรียกว่าโปรแกรม Keil เพื่อเปลี่ยนภาษาซีเป็นไฟล์นามสกุล .hex ต่อจากนั้นจะโหลดไฟล์นามสกุล .hex ลงสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นการสิ้นสุดขั้นตอนโดยวิธีการสร้างโค้ดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงแผนภูมิการสร้างโค้ดของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังนี้

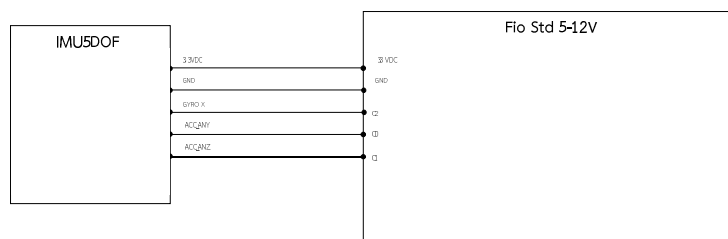


ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการสร้างโค้ดของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3.3 การเลือกใช้เซนเซอร์

การเลือกใช้เซนเซอร์นั้นจะต้องพิจารณาถึงแกนที่รักษาสมดุล โดยแกนที่รักษาสมดุลนั้นจะรักษาสมดุลในแกนด้านหน้าและด้านหลังซึ่งเป็นแกนระนาบเดียว ดังนั้นจึงต้องเลือกเซนเซอร์ที่สามารถให้ค่ามุมได้ในหนึ่งระนาบขึ้นไป แต่เซนเซอร์ที่จะนำมาใช้จะเลือกเป็นเซนเซอร์ที่สามารถขยับตำแหน่งบนระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงได้อิสระ โดยเซนเซอร์ที่ใช้งานคือเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วโดยมีชื่อภาษาไทย คือเซนเซอร์วัดความเฉื่อยและมีชื่อภาษาอังกฤษ คือ IMU5(Inertial measurement unit 5:IMU 5) ซึ่งเลข 5 จะบอกจำนวนขององศาอิสระ

ในการใช้งานเซนเซอร์วัดความเร่งจะประยุกต์หาค่ามุมได้จากมุมของผลรวมแรงโน้มถ่วงจำเพาะในแนวแกน Y และแนวแกน Z และเซนเซอร์วัดความเฉื่อยจะนำความเร็วของการหมุนรอบแกน X มาอินทิเกรตหาค่ามุมของแกน Y และแกน Z โดยที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเซนเซอร์จะนำแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยวงจรทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3.7 วงจรไฟฟ้ารับค่าจากสัญญาณเซนเซอร์



ภาพที่ 3.7 วงจรไฟฟ้ารับค่าจากสัญญาณเซนเซอร์

3.4 การจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงาน

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

ตารางที่ 3-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

อุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงงาน	แบบลักษณะของอุปกรณ์	จำนวน
ลื้อ	เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว	3 วง
เซนเซอร์	ชนิดMEM สามารถวัดความเร็วและความเอียงได้	1 ตัว
แหล่งจ่ายแรงดัน+แบตเตอรี่	แบบจ่ายแรงดันได้ 12 โวลต์	2 อัน
ไมโครคอนโทรลเลอร์	รุ่นFio Standard	1 ตัว

3.4.2 งบประมาณที่ใช้ในการทำโครงงาน

ตารางที่ 3-2 งบประมาณที่ใช้ในการทำโครงงาน

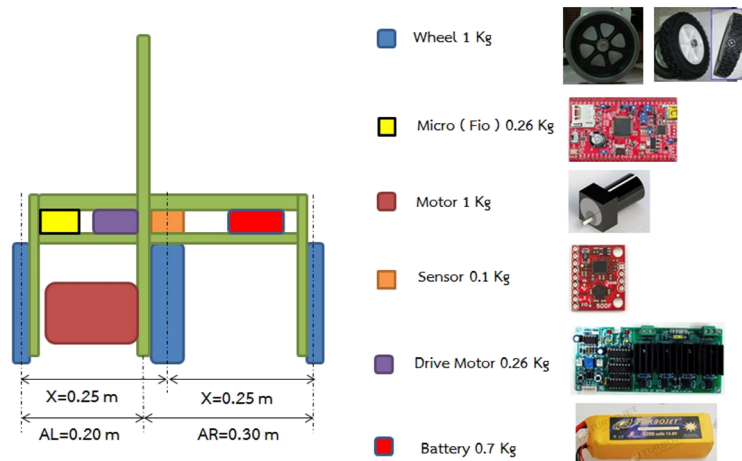
อุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงงาน	จำนวน	ราคา
ลื้อ	3 วง	1000 บาท
เซนเซอร์	3แกน	4480 บาท
แบตเตอรี่	2 อัน	1400 บาท
ไมโครคอนโทรลเลอร์	1 ตัว	2780 บาท
อุปกรณ์ในการทำโครงสร้าง		500 บาท
รวม		10160 บาท

3.5 การออกแบบโครงสร้างและวงจรต่างๆ

3.5.1 ออกแบบโครงสร้างระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง

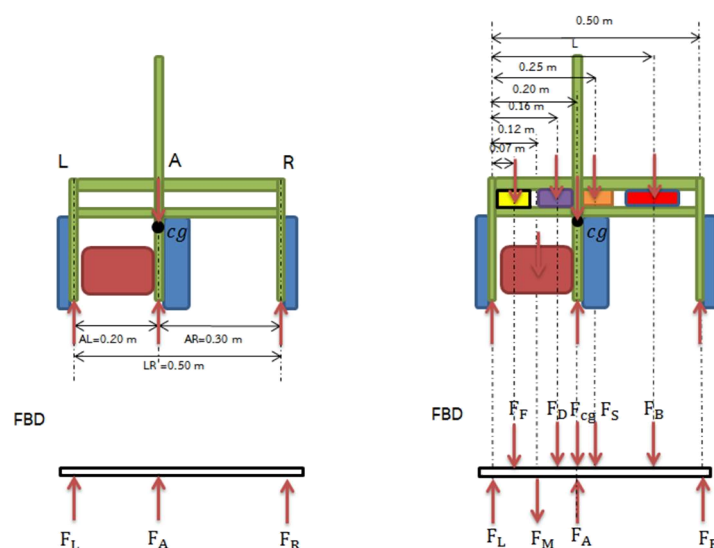
ก่อนการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงการวางอุปกรณ์ เพราะน้ำหนักของอุปกรณ์จะส่งผลถึงความสมดุลของด้านที่ไม่มีตัวควบคุมรักษาสมดุลของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง ดังนั้น การวางอุปกรณ์แต่ละชนิดจะใช้วิธีการวางให้ได้สมดุลตามแนวแกน กล่าวคือ ด้านซ้ายและด้านขวาจะต้องมีน้ำหนักเท่ากัน เพื่อรักษาสมดุลของแกนที่ไม่มีตัวควบคุมรักษาสมดุลและทำให้เกิดการหมุนอันเนื่องมาจากแรงของน้ำหนักที่กระทำต่อพื้นโลก เพราะน้ำหนักจะทำให้เกิดแรงเสียดทานกระทำต่อล้อไม่เท่ากัน ดังนั้น เมื่อต้องการให้ล้อทางด้านซ้ายและล้อทางด้านขวามีระยะที่เท่ากัน โดยที่น้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานไม่เท่ากัน จึงต้องทำการคิดค่าของน้ำหนักวัสดุที่มีน้ำหนักมากเป็นหลัก ซึ่งน้ำหนักวัสดุที่มีมากที่สุดคือมอเตอร์ซึ่งอยู่ทางด้านซ้าย จึงต้องพิจารณาดำเนินการของวัสดุอุปกรณ์ทางด้านขวาเป็น โดยจะใช้แบตเตอรี่เป็นแรงของที่กระทำต่อน้ำหนักทางด้านขวา เพื่อให้

ได้ความสมดุลของน้ำหนัก โดยตำแหน่งอุปกรณ์กำหนดดังภาพที่ 3.8 การวางตำแหน่งอุปกรณ์และน้ำหนักของอุปกรณ์



ภาพที่ 3.8 การวางตำแหน่งอุปกรณ์และน้ำหนักของอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากน้ำหนักอันเนื่องมาจากการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่อไปจะเป็นการพิจารณาระยะตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ โดยเมื่อทำการประกอบอุปกรณ์ทางด้านฝั่งของมอเตอร์เสร็จแล้ว จะต้องทำการวัดน้ำหนักของล้อทางด้านฝั่งมอเตอร์ เพื่อที่จะหาระยะตำแหน่งการวางของแบตเตอรี่ เพื่อให้น้ำหนักด้านข้างที่เท่ากัน โดยเมื่อนำแรงทั้งหมดมาเขียนเป็นภาพของไดอะแกรมแรงอิสระ(Free-Body Diagram:FBD) เขียนได้ดังภาพที่ 3.9 FBD ของโครงสร้างระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสถิตแนวตรง



ภาพที่ 3.9 FBD ของโครงสร้างระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสถิตแนวตรง

โดยสัญลักษณ์ของแรงต่างๆและขนาดจะแสดงดังนี้

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงสัญลักษณ์ของแรงและขนาดของแรง

สัญลักษณ์ ของแรง	แรงที่กระทำ	ขนาดของแรง (N)
F_L	แรงที่กระทำจากจุด L	$F_L = F_R$
F_A	แรงที่กระทำจากจุด A	$F_A = ?$
F_R	แรงที่กระทำจากจุด R	$F_R = F_L$
F_F	แรงจากน้ำหนักไมโครคอนโทรลเลอร์	$F_F = 0.311 \times 9.8 = 3.04$
F_D	แรงจากน้ำหนักชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	$F_D = 0.311 \times 9.8 = 3.04$
F_S	แรงจากน้ำหนักเซนเซอร์	$F_S = 0.3 \times 9.8 = 2.94$
F_B	แรงจากน้ำหนักแบตเตอรี่	$F_B = 1.3 \times 9.8 = 12.74$
F_M	แรงจากน้ำหนักมอเตอร์	$F_M = 1 \times 9.8 = 9.8$
F_{cg}	แรงจากน้ำหนักโครงสร้างที่ตกที่จุดศูนย์กลาง	$F_{cg} = 5.13 \times 9.8 = 50.27$

เมื่อต้องการให้น้ำหนักด้านซ้ายมีน้ำหนักเท่ากับด้านขวาแล้ว ดังนั้นแรงที่จุด L จะต้องมีความเท่ากับแรงที่จุด R ดังนั้น เมื่อพิจารณาแล้วเหลือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือแรงที่จุด A และระยะของแบตเตอรี่โดยแรงที่จุด L จะสามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักด้านซ้ายของโครงสร้างระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงดังภาพที่ 3.10 น้ำหนักทางด้านซ้ายของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง



ภาพที่ 3.10 น้ำหนักทางด้านซ้ายของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรง

เมื่อทราบตัวแปรครบทุกตัวแล้ว เพื่อที่ต้องการหาระยะที่วางแบตเตอรี่จึงใช้สูตรผลรวมโมเมนต์มีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุด A ดังนี้

$$\sum M_A = 0 \quad (3-7)$$

โดยที่

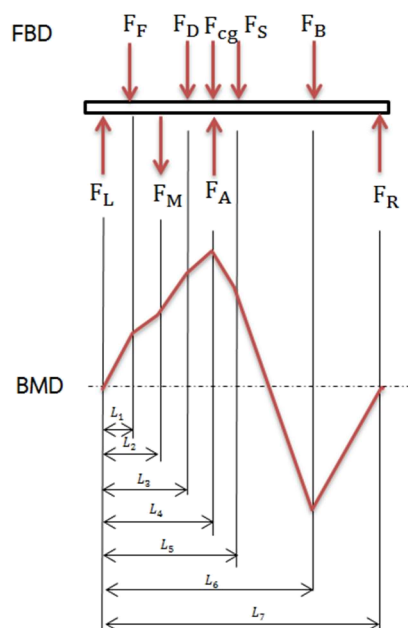
M_A คือ โมเมนต์ที่จุด A มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร ($N \cdot m$)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$2.3(9.8)(0.20) + 2.94(0.25 - 0.20) + 11.76(L - 0.20) - 2.56(0.20 - 0.07) - 9.8(0.20 - 0.16) - 2.56(0.16 - 0.12) - 2.3(9.8)(0.50 - 0.20) = 0$$

$$L = 0.400 \text{ เมตร}$$

เมื่อทราบถึงระยะของแบตเตอรี่ที่ทำให้แรงทั้งสองฝั่งเท่ากันแล้ว สามารถนำแรงมาคำนวณหาโมเมนต์ในแต่ละจุด เพื่อนำโมเมนต์ของจุดที่มีค่าสูงสุดมากำหนดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ได้ แต่ในก่อนการคำนวณจะต้องทราบระยะห่างของแต่ละจุด ซึ่งกำหนดให้จุด L เป็นตำแหน่งจุดอ้างอิง ซึ่งสามารถเขียนเป็นภาพได้ดังนี้



ภาพที่ 3.11 ระยะของแต่ละจุดซึ่งจุด L เป็นจุดอ้างอิง

โดยแต่ละสัญลักษณ์ของระยะของแต่ละจุด แสดงขนาดดังนี้

ตารางที่ 3-4 ตารางแสดงระยะแต่ละจุดเทียบกับจุดอ้างอิง

สัญลักษณ์	ระยะ
L_1	0.07 เมตร
L_2	0.12 เมตร
L_3	0.16 เมตร
L_4	0.20 เมตร
L_5	0.25 เมตร
L_6	0.40 เมตร
L_7	0.50 เมตร

ซึ่งแผนผังโมเมนต์ตัดแต่ละจุดหาได้จากสูตรดังนี้

$$\sum M_{\text{Find}} = 0 \quad (3-8)$$

โดยที่

M_{Find} คือ โมเมนต์ที่จุดต้องการหา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร ($\text{N} \cdot \text{m}$)

ซึ่งจุด L เป็นจุดอ้างอิงจะไม่เกิดโมเมนต์จึงเริ่มคิดที่จุด F ก่อนดังนี้

$$\sum M_F = 0 \quad (3-9)$$

$$M_F = F_L (L_1) + F_F (0)$$

โดยที่ M_F คือ โมเมนต์ที่จุด F มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_F = 2.3(9.8)(0.047) + F_F (0) = 1.06 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โมเมนต์ที่จุด M สามารถหาได้ดังนี้

$$\Sigma M_M = 0 \quad (3-10)$$

$$M_M = F_L (L_2) - F_F (L_2 - L_1) + F_M (0)$$

โดยที่ M_M คือ โมเมนต์ที่จุด M มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_2 คือ ระยะ L_2 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_M = 2.3(9.8)(0.07) - 3.04 (0.12 - 0.07) + F_M (0) = 1.41 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โมเมนต์ที่จุด D สามารถหาได้ดังนี้

$$\Sigma M_D = 0 \quad (3-11)$$

$$M_D = F_L (L_3) - F_F (L_3 - L_1) - F_M (L_3 - L_2) + F_D (0)$$

โดยที่ M_D คือ โมเมนต์ที่จุด D มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_2 คือ ระยะ L_2 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_3 คือ ระยะ L_3 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_D = 2.3(9.8)(0.16) - 3.04(0.16 - 0.07) - 9.8(0.16 - 0.12) + FD(0) = 2.94 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โมเมนต์ที่จุด A สามารถหาได้ดังนี้

$$\sum M_A = 0 \quad (3-12)$$

$$M_A = F_L(L_4) - F_F(L_4 - L_1) - F_M(L_4 - L_2) - F_D(L_4 - L_3) + (F_A - F_{cg})(0)$$

โดยที่ M_A คือ โมเมนต์ที่จุด A มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_A คือ แรงที่จุด A มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_{cg} คือ แรงที่จุด cg มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_2 คือ ระยะ L_2 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_3 คือ ระยะ L_3 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_4 คือ ระยะ L_4 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_A = 2.3(9.8)(0.20) - 3.04(0.20 - 0.07) - 9.8(0.20 - 0.12) - 3.04(0.20 - 0.16) + (F_A - F_{cg})(0) = 3.20 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โดยสามารถหาแรง F_A ได้จากสูตร

$$F_{\text{ขึ้น}} = F_{\text{ลง}} \quad (3-13)$$

ดังนั้น

$$F_A = -F_L - F_R + F_F + F_M + F_D + F_{cg} + F_S + F_B$$

โดยที่

F_A คือ แรงที่จุด A มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_R คือ แรงที่จุด R มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_{cg} คือ แรงที่จุด cg มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_s คือ แรงที่จุด S มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_B คือ แรงที่จุด B มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$F_A = -2.3(9.8) - 2.3(9.8) + 3.04 + 9.8 + 3.04 + 50.27 + 2.94 + 12.74 = 36.75 \text{ นิวตัน}$$

โมเมนต์ที่จุด S สามารถหาได้ดังนี้

$$\Sigma M_s = 0 \quad (3-14)$$

$$M_s = F_L(L_5) - F_F(L_5 - L_1) - F_M(L_5 - L_2) - F_D(L_5 - L_3) + (F_A - F_{cg})(L_5 - L_4) - F_s(0)$$

โดยที่ M_s คือ โมเมนต์ที่จุด S มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_A คือ แรงที่จุด A มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_{cg} คือ แรงที่จุด cg มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_s คือ แรงที่จุด S มีค่าตามตารางที่3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_2 คือ ระยะ L_2 มีค่าตามตารางที่3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_3 คือ ระยะ L_3 มีค่าตามตารางที่3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_4 คือ ระยะ L_4 มีค่าตามตารางที่3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_5 คือ ระยะ L_5 มีค่าตามตารางที่3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_s = 2.3(9.8)(0.25) - 3.04(0.25 - 0.07) - 9.8(0.25 - 0.12) - 3.04(0.25 - 0.16) + (36.75 - 50.27)(0.25 - 0.20) - F_s(0) = 2.86 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โมเมนต์ที่จุด B สามารถหาได้ดังนี้

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3-15)$$

$$M_B = F_L(L_6) - F_F(L_6 - L_1) - F_M(L_6 - L_2) - F_D(L_6 - L_3) + (F_A - F_{cg})(L_6 - L_4) - F_s(L_6 - L_5) - (F_B)(0)$$

โดยที่ M_B คือ โมเมนต์ที่จุด B มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_A คือ แรงที่จุด A มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_{cg} คือ แรงที่จุด cg มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_S คือ แรงที่จุด S มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_B คือ แรงที่จุด B มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_1 คือ ระยะ L_1 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_2 คือ ระยะ L_2 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_3 คือ ระยะ L_3 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_4 คือ ระยะ L_4 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_5 คือ ระยะ L_5 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_6 คือ ระยะ L_6 มีค่าตามตารางที่ 3-4 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M_B = 2.3(9.8)(0.40) - 3.04(0.40 - 0.07) - 9.8(0.40 - 0.12) - 3.04(0.40 - 0.16) \\ + (36.75 - 50.27)(0.40 - 0.20) - 2.94(0.40 - 0.25) - F_B(0) = -12.71 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

โมเมนต์ที่จุด R สามารถหาได้ดังนี้

$$\sum M_R = 0 \quad (3-16)$$

$$M_R = F_L(L_7) - F_F(L_7 - L_1) - F_M(L_7 - L_2) - F_D(L_7 - L_3) + (F_A - F_{cg})(L_7 - L_4) - F_S(L_7 - L_5) - F_B(L_7 - L_6) + F_R(0)$$

โดยที่ M_R คือ โมเมนต์ที่จุด R มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_L คือ แรงที่จุด L มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_F คือ แรงที่จุด F มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_M คือ แรงที่จุด M มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_D คือ แรงที่จุด D มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_A คือ แรงที่จุด A มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_{cg} คือ แรงที่จุด cg มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_S คือ แรงที่จุด S มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

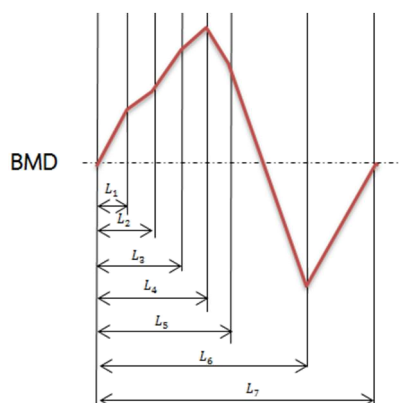
F_B คือ แรงที่จุด B มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

F_R	คือ แรงที่จุด R	มีค่าตามตารางที่ 3-2	มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
L_1	คือ ระยะ L_1	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_2	คือ ระยะ L_2	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_3	คือ ระยะ L_3	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_4	คือ ระยะ L_4	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_5	คือ ระยะ L_5	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_6	คือ ระยะ L_6	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)
L_7	คือ ระยะ L_7	มีค่าตามตารางที่ 3-4	มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

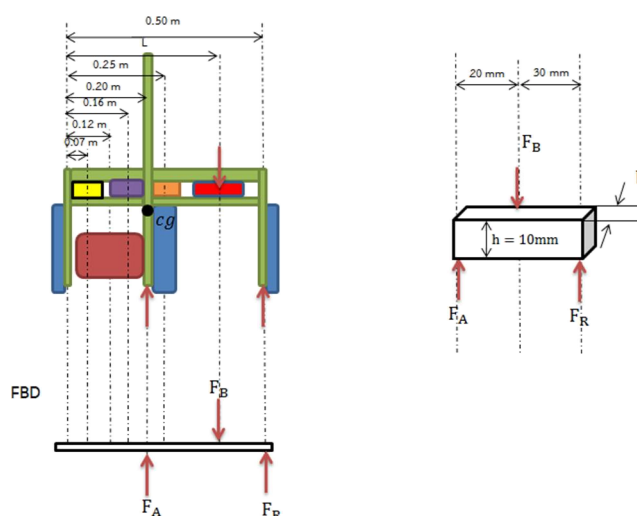
$$M_R = 2.3(9.8)(0.40) - 3.04(0.40 - 0.07) - 9.8(0.40 - 0.12) - 3.04(0.40 - 0.16) + (36.75 - 50.27)(0.40 - 0.20) - 2.94(0.40 - 0.25) - F_R(0) = 0 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

ค่าโมเมนต์ทุกจุดที่ได้สามารถนำมาเขียนแผนผังโมเมนต์ดัด (Bending moment diagram : BMD) จะได้ดังภาพที่ 3.12 แผนผัง BMD



ภาพที่ 3.12 แผนผัง BMD

เมื่อได้ FBD และ BMD แล้ว จะนำจุดที่เกิดโมเมนต์สูงสุดคือ จุด F_B หรือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของแบตเตอรี่ เนื่องจากแรงของแบตเตอรี่ทำให้เกิดความเค้นดัดสูงสุด เพื่อนำมาหาขนาดของวัสดุที่จะนำมาใช้งาน ดังภาพที่ 3.12 FBD ของแรงเมื่อพิจารณาจากน้ำหนักแบตเตอรี่



ภาพที่ 3.13 FBD ของแรงเมื่อพิจารณาจากน้ำหนักเบตเตอร์

โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำโครงสร้างเลือกใช้ไม้เนื้อแข็งเคลือบขาวเพราะมีน้ำหนักที่เบา และสามารถสร้างได้ง่าย โดยไม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 48 เมกะปาสกาล ดังนั้น จะนำค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักน้อยที่สุดมาคิดในการหาขนาด โดยสูตรการหาความเค้นดัดสูงสุดสามารถหาได้ดังนี้

$$\sigma_b = \frac{M_M \times C}{I} \quad (3-17)$$

โดยที่

σ_b คือ ความเค้นดัดสูงสุด มีหน่วยเป็น เมกะปาสกาล (MPa)

M_M คือ โมเมนต์ของจุดที่มีโมเมนต์สูงสุด มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

C คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่เลือกใช้ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ไม้มีค่าเท่ากับ 0.75

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย(moment of inertia)มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร (cm²)

โดยที่โมเมนต์ที่จะนำมาคำนวณจะนำด้านของฝั่งที่ยาวที่สุดมาคิดเพราะด้านที่ยาวที่สุดจะมีค่าโมเมนต์สูงสุดด้วยโดยสมการการหาค่าของโมเมนต์แสดงดังต่อไปนี้

$$M_M = F_B \times L_M \quad (3-18)$$

โดยที่

M_M คือ โมเมนต์ของจุดที่มีโมเมนต์สูงสุด มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m)

F_B คือ แรงที่จุด B มีค่าตามตารางที่ 3-2 มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L_M คือ ระยะสูงสุดของด้านขา มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

เมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$M = 12.74 \times 3 = 0.03822 \text{ นิวตันต่อเซนติเมตร}$$

โดยไม้ที่เลือกใช้เป็นไม้ที่มีขนาด 10 mm มีโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วดังสูตรต่อไปนี้

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (3-19)$$

โดยที่

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของวัตถุ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร (cm^2)

b คือ ความยาวของวัตถุ มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

h คือ ความหนาของวัตถุ มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

โดยในที่นี้ $h = 1$ เซนติเมตรและ $b = 1.5$ เซนติเมตรเมื่อนำมาแทนลงในสูตรจะได้ดังนี้

$$I = \frac{1.5 \times 1^3}{12} = 0.125 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้น ค่าความเค้นสูงสุดมีค่าดังนี้

$$\sigma_b = \frac{0.03822 \times 0.75}{0.125} = 0.229 \text{ กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร}$$

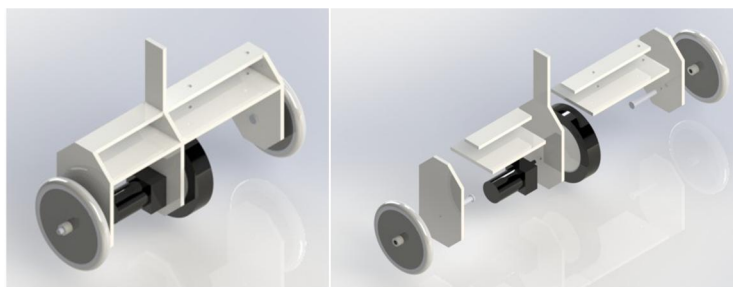
โดยจะแปลงให้เป็นหน่วยของเมกะปาสคาลได้ดังสมการดังนี้

$$* \text{Megapascal} = 10.19716213 \times \sigma_b \quad (3-20)$$

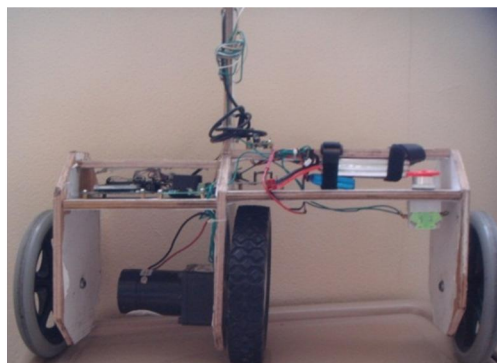
$$* \text{Megapascal} = 10.19716213 \times 0.229 = 2.338 \text{ เมกะปาสคาล}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักน้อยที่สุดของไม้มีค่าเท่ากับ 48 เมกะปาสคาลแต่ค่าสัมประสิทธิ์การแตกหักน้อยที่สุดในนี้มีค่าเท่ากับ 2.338 เมกะปาสคาลซึ่งสามารถนำไปใช้ได้โดยสาเหตุที่เอาหน้ากว้างเพื่อที่จะใส่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ลงไปในด้านบนได้

เมื่อได้ระยะห่างการวางของแบตเตอรี่และขนาดของไม้ที่นำมาใช้งานแล้ว จึงออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ก (Solid work) และสร้างโครงสร้างจริงของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง ดังภาพที่ 3.14 โครงสร้างบนโปรแกรมเขียนแบบด้วยโซลิดเวิร์คและภาพที่ 3.15 ระบบขับเคลื่อนล้อเดียรรักษาสมดุลแนวตรง



ภาพที่ 3.14 โครงสร้างบนโปรแกรมเขียนแบบด้วยโซลิดเวิร์ค (Solid work)



ภาพที่ 3.15 ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง

จากนั้นทดสอบน้ำหนักด้านซ้ายและด้านขวาด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก ดังภาพที่ 3.15 น้ำหนักด้านข้างของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง



ภาพที่ 3.16 น้ำหนักด้านข้างของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง

เมื่อทดสอบแล้วผลปรากฏว่าได้น้ำหนักที่มีขนาดใกล้เคียงกันตามการคำนวณไว้ในตอนต้น

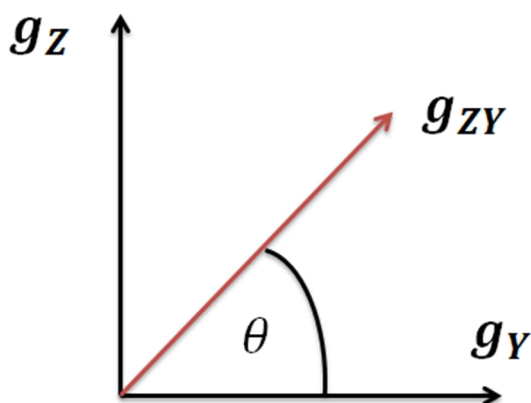
3.6 การรับค่าเซนเซอร์

ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงใช้เซนเซอร์วัดค่าความเร่งและเซนเซอร์วัดความเอียงของบริษัท สปากฟืน(Spark Fun) ชนิดIMU(Inertial Measurement Unit:IMU) ประกอบไปด้วยเซนเซอร์จำนวน 5 แกน เพื่อหาค่ามุมของการเอียง โดยเซนเซอร์ทั้งสองชนิดนี้จะส่งค่าแรงดันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วและค่าความเอียงของเซนเซอร์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลในการหาค่ามุม

3.6.1 การรับค่าเซนเซอร์วัดความเร่ง

เซนเซอร์วัดค่าความเร่ง ใช้ไอซีเบอร์ ADXL335 สามารถวัดค่าความเร่งในแนวแกนระดับและแนวตั้งทั้งหมด 3 แกน มีช่วงขอบเขตการวัดมากที่สุดคือ ± 3 ระดับแรงโน้มถ่วงจำเพาะ ค่าความละเอียด 300 มิลลิโวลต์ต่อระดับแรงโน้มถ่วงจำเพาะ ใช้ไฟเลี้ยงไฟฟ้ากระแสตรง 3.3 โวลต์

เซนเซอร์วัดความเร่งจะรับสัญญาณเข้ามาสองแกน แกน Y และแกน Z เพื่อหาค่ามุมที่เกิดจากความเร่งลัพธ์ของแกน Y และแกน Z โดยเซนเซอร์ที่ใช้งานจะส่งค่าออกมาเป็นสัญญาณรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ เมื่อเกิดค่ามุมที่เปลี่ยนไปตามแนวแกนของเซนเซอร์ แต่ก่อนที่จะได้ค่ามุมนั้น จะต้องทำการเปลี่ยนแรงดันในรูปของค่าแรงโน้มถ่วงจำเพาะก่อน ซึ่งมีหน่วยเท่ากับเมตรต่อวินาทียกกำลังสอง โดยเมื่อพิจารณาคู่มือของเซนเซอร์แล้วใน 1 แรงโน้มถ่วงจำเพาะของเซนเซอร์จะมีค่าแรงดันเปลี่ยนแปลง 330 มิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงต้องนำค่าของ 330 มิลลิโวลต์ ไปหารแรงดันที่รับเข้ามาเพื่อแปลงให้อยู่ในรูปของแรงโน้มถ่วงจำเพาะในแนวแกน และเมื่อได้แรงโน้มถ่วงจำเพาะในแนวแกนแล้ว ค่าที่ต้องการคือค่าของมุมของผลรวมแรงโน้มถ่วงจำเพาะซึ่งหาได้จากความเร่งลัพธ์ระหว่างแกน Y และแกน Z โดยแสดงดังภาพที่ 3.17 ค่ามุมของความเร่งลัพธ์ระหว่างความเร่งในแกน Y และแกน Z

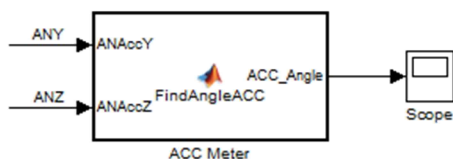


ภาพที่ 3.17 ค่ามุมของความเร่งลัพธ์ระหว่างความเร่งในแกน Y และแกน Z

ดังนั้นสูตรของการหาค่าของมุมของผลรวมแรงโน้มถ่วงจำเพาะในแนวแกนระหว่างแกน Y และแกน Z มีค่าดังนี้

$$\text{angle}(\theta) = \arctan\left(\frac{\text{static gravity in Z axis}}{\text{static gravity in Y axis}}\right) \quad (3-21)$$

เมื่อนำสมการมาเขียนบนโปรแกรม MATLABTM จะได้ดังภาพที่ 3.17 สมการเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อหาค่ามุมบนโปรแกรม MATLABTM ซึ่งโค้ดการประยุกต์ใช้จะแสดงในภาคผนวก

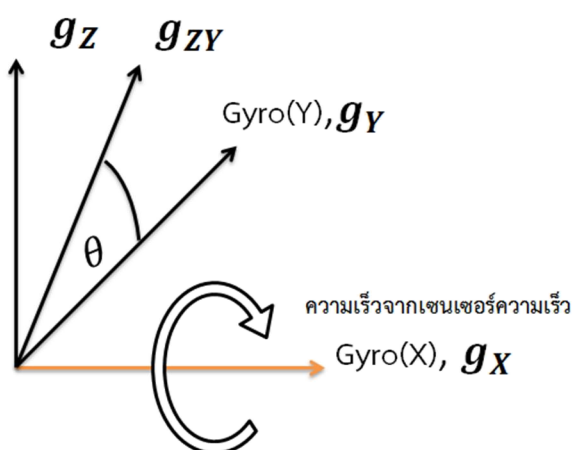


ภาพที่ 3.18 สมการเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อหาค่ามุมบนโปรแกรมMATLAB™

3.6.2 การรับค่าเซนเซอร์วัดความเร็ว

เซนเซอร์วัดความเร็วจะวัดความเร็วอยู่ในรูปแบบการวัดความเร็วของการหมุนรอบแกน เพื่อต้องการหาค่ามุมของเซนเซอร์วัดความเร่งในแนวแกน Y และแกน Z จะต้องวัดความเร็วเชิงมุมที่เป็นตรงข้ามกับเซนเซอร์วัดความเร่งจากนั้นเข้าสู่การอินทิเกรตเพื่อให้ได้ค่ามุม โดยที่เซนเซอร์ที่ใช้งานจะส่งค่าออกมาเป็นสัญญาณรูปแบบอนาล็อก (Analog)

เซนเซอร์วัดความเร็วใช้เป็นไอซีเบอร์ IDG500 สามารถวัดค่าความเร็วได้ทั้งหมดมี 2 แกน มีช่วงขอบเขตการวัดมากที่สุดคือ ± 500 องศาต่อวินาที มีค่าค่าความละเอียด 2 มิลลิโวลต์ต่อองศาต่อวินาที โดยเซนเซอร์วัดความเร็วนี้จะบอกมาเป็นความเร็วเชิงมุมที่หมุนรอบในแนวแกน ดังนั้นเมื่อความเร็วของแนวแกนเปลี่ยนจะทำให้ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงไป แต่ถ้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันก็จะมีค่าอยู่ในค่าหนึ่งเช่นเดิมเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปดังภาพที่ 3.19 ความเร็วเชิงมุมของแนวแกน X



ภาพที่ 3.19 ความเร็วเชิงมุมของแนวแกน X

โดยเซนเซอร์วัดค่าความเอียงจะเปลี่ยนแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 ตามค่าความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนไปในแนวแกนของเซนเซอร์ แต่จะต้องทำการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นรูปของความเร็วเชิงมุมในแนวแกนซึ่งมีหน่วยเท่ากับเมตรต่อวินาที โดยเมื่อพิจารณาคู่มือของเซนเซอร์แล้ว ใน 1 วินาทีของเซนเซอร์จะมีค่าแรงดันเปลี่ยนแปลง 2 มิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงนำค่าของ 2 มิลลิโวลต์ไปหารแรงดันที่

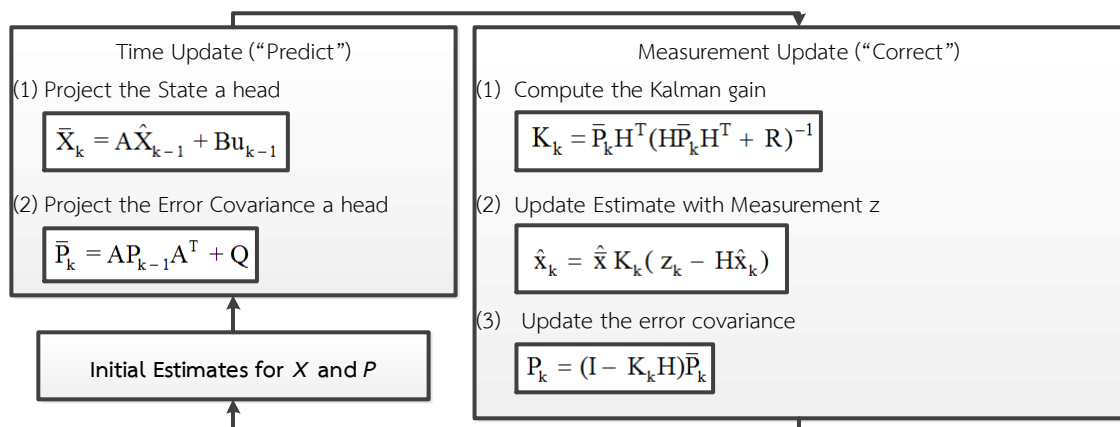
รับเข้ามาเพื่อแปลงให้อยู่ในรูปของค่าความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนไปในแนวแกนของเซนเซอร์ ซึ่งเมื่อได้ความเร็วเชิงมุมแล้ว ดังนั้น ค่ามุมของเซนเซอร์วัดความเอียงหาได้จากการอินทิเกรตค่าของความเร็วเชิงมุมนั่นเอง ดังภาพที่ 3.20 สมการการใช้เซนเซอร์วัดความเอียงบนโปรแกรมMATLABTM ซึ่งโค้ดการประยุกต์ใช้จะแสดงในภาคผนวก



ภาพที่ 3.20 สมการการใช้เซนเซอร์วัดความเอียงบนโปรแกรมMATLABTM

3.7 การกรองค่าเซนเซอร์ด้วยสมการKalman Filter

ปัญหาของเซนเซอร์ทั้งสองที่ได้กล่าวมาในข้างต้น คือเนื่องจากเซนเซอร์ทั้งสองไม่ใช่เซนเซอร์ที่มีค่ามุมแบบสมบูรณ์ โดยเซนเซอร์วัดความเร่งวัดความเร่งลัพธ์ของแนวแกน เพื่อใช้หาค่ามุม ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลทำให้เซนเซอร์เกิดการผิดเพี้ยนไป และเซนเซอร์วัดความเอียงจะหาค่ามุมด้วยวิธีการอินทิเกรตความเร็วเชิงมุมเพื่อหาค่ามุมทำให้เกิดการสะสมของความผิดพลาด แต่สิ่งที่ต้องการคือค่ามุมที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจึงต้องใช้สมการKalman Filter เพื่อหาค่าประมาณของระบบเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในระบบโดยใช้เซนเซอร์ทั้งสองเพื่อหาค่ามุม โดยเมื่อได้ค่าในเชิงมุมของเซนเซอร์ทั้งสองของเซนเซอร์แล้วจากนั้นนำเซนเซอร์มาเข้าสมการKalman Filter เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดโดยสมการKalman Filter โดยที่กระบวนการทำงานของสมการKalman Filterดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 กระบวนการทำงานของสมการKalman Filter

จากภาพจะเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นการประมาณค่าของ X และ P ก่อน โดยจะกำหนดให้ค่าทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0 ทั้งหมด ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดค่าความแปรปรวนเบื้องต้นในสมการดังนี้

$$\bar{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3-22)$$

โดยที่

P_k คือ ความแปรปรวนของระบบที่เกิดจากเวลาใหม่

P_{k-1} คือ ความแปรปรวนของระบบที่เกิดจากเวลาเดิม

A คือ สมการถ่ายโอนเวลาของระบบ

Q คือ ค่าความแปรปรวนของเซนเซอร์

โดยที่ค่าของ A ซึ่งเป็นสมการถ่ายโอนของคาบเวลาและค่าของ Q ซึ่งเป็นความผิดพลาดของเซนเซอร์ มีสมการดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

โดยที่ dt คือ คาบเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์(Sampling Time)

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} & 0 \\ 0 & Q_{\text{gyro}} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

โดยที่

Q_{angle} คือ ค่าความแปรปรวนเบื้องต้นของเซนเซอร์วัดความเร่ง

Q_{gyro} คือ ค่าความแปรปรวนเบื้องต้นของเซนเซอร์วัดความเอียง

ซึ่งสามารถเขียนสมการค่าความแปรปรวนเบื้องต้นทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_{k-1} \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} & 0 \\ 0 & Q_{\text{gyro}} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

โดยค่าของความแปรปรวนของเซนเซอร์นำมาจากคู่มือการใช้งานของเซนเซอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$Q_{\text{angle}} = 0.001 \text{ และ } Q_{\text{gyro}} = 0.003$$

ขั้นตอนต่อไปจะต้องหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของระบบในรูปแบบของสเตตเวลาดังสมการดังนี้

$$X_k = AX_{k-1} + BU_{k-1} + W_{k-1} \quad (3-26)$$

โดยที่

X_k คือ สเตตของระบบที่เวลาใหม่

X_{k-1} คือ สเตตของระบบที่เวลาเดิม

U_{k-1} คือ สเตตของระบบที่เวลาเดิม

A คือ สมการถ่ายโอนเวลาของระบบ

B คือ สมการถ่ายโอนเวลาของระบบ

W_{k-1} คือ สัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัด(Noise Measurement)

แต่การคำนวณจะไม่นำค่าของ W_{k-1} หรือ สัญญาณรบกวนนำมาคำนวณในสมการจึงเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{matrix} \alpha \\ \text{bias}_k \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X_{k-1} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} U_{k-1} \quad (3-27)$$

โดยที่

dt คือ คาบเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

α คือ ตัวแปรค่าประมาณของระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใหม่

bias คือ ตัวแปรค่าประมาณของระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใหม่

เมื่อได้สมการการปรับค่าเวลาใหม่ขั้นตอนต่อไปเป็นสมการของการปรับค่าของการวัดโดยเริ่มจากการปรับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของดังนี้

$$K_k = \bar{P}_k H^T (H \bar{P}_k H^T + R)^{-1} \quad (3-28)$$

โดยที่

K_k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง

$\bar{P}_k$ คือ ความแปรปรวนของระบบที่เวลาใหม่

H คือ สมการถ่ายโอนของระบบ

R คือ ความแปรปรวนจากการวัด

โดยที่ค่าของ H เป็นสมการถ่ายโอนของเซนเซอร์ มีสมการดังนี้

$$H = [1 \quad 0] \quad (3-29)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการการปรับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_k [1 \quad 0]^T ([1 \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_k [1 \quad 0]^T + R)^{-1} \quad (3-30)$$

โดยที่ R เป็นค่าความแปรปรวนจากการวัดซึ่งไม่สามารถกำหนดเบื้องต้นได้ต้องเขียนสมการให้ครบจึงสามารถกำหนดได้ โดยจากการทดลองปรับเมื่อเขียนสมการเสร็จแล้วพบว่า เมื่อปรับค่า R มากกว่า 1 ค่าของเซนเซอร์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของเซนเซอร์วัดความเอียงที่ได้มาแต่เมื่อปรับน้อยกว่า 1 ค่าจะมีผลทำให้มีค่าใกล้เคียงกับเซนเซอร์วัดความเร่ง ดังนั้นจึงทดลองปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่

ดีที่สุด พบว่าค่า $R = 0.01$ ทำให้ผลของสมการKalman ส่งผลดีที่สุดซึ่งจะแสดงในบทที่4 การบันทึกผลการทดลอง

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดสมการการเปลี่ยนแปลงค่าเซนเซอร์ โดยเมื่อเซนเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าจะต้องส่งผลให้สมการการเปลี่ยนแปลงค่าดังสมการดังนี้

$$\hat{x}_k = \hat{x} K_k (z_k - H\hat{x}_k) \quad (3-31)$$

โดยที่

X_k คือ สเตตของระบบที่เวลาใหม่

$\hat{x}$ คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงของสมการKalman Filter ณเวลาปัจจุบัน

K_k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง

z_k คือ ค่าที่ได้จากการวัด

H คือ สมการถ่ายโอนของระบบ

โดยที่ $\hat{x}$ และ z_k มีสมการได้ดังนี้

$$\hat{x} = \text{newangle}_{\text{Kalmanfilter}} - \text{oldangle}_{\text{sensor}} \quad (3-32)$$

โดยที่

$\text{newangle}_{\text{Kalmanfilter}}$ คือ ค่ามุมที่ได้จากสมการKalman Filter

$\text{oldangle}_{\text{sensor}}$ คือ ค่ามุมที่ได้จากเซนเซอร์

$$z_k = [1 \ 0] \quad (3-33)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงค่าของเซนเซอร์ทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \text{bias} \end{bmatrix}_k = \text{newangle}_{\text{Kalmanfilter}} - \text{oldangle}_{\text{sensor}} \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{bmatrix}_k ([1 \ 0] - [1 \ 0] \begin{bmatrix} \alpha \\ \text{bias} \end{bmatrix}_k) \quad (3-34)$$

โดยที่

α คือ ตัวแปรค่าประมาณของระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใหม่

bias คือ ตัวแปรค่าประมาณของระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใหม่

ขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับค่าความเปลี่ยนแปลงใหม่ดังสมการดังนี้

$$P_k = (1 - K_k H) \bar{P}_k \quad (3-35)$$

โดยที่

$\bar{P}_k$ คือ ความแปรปรวนของระบบที่เวลาใหม่

K_k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง

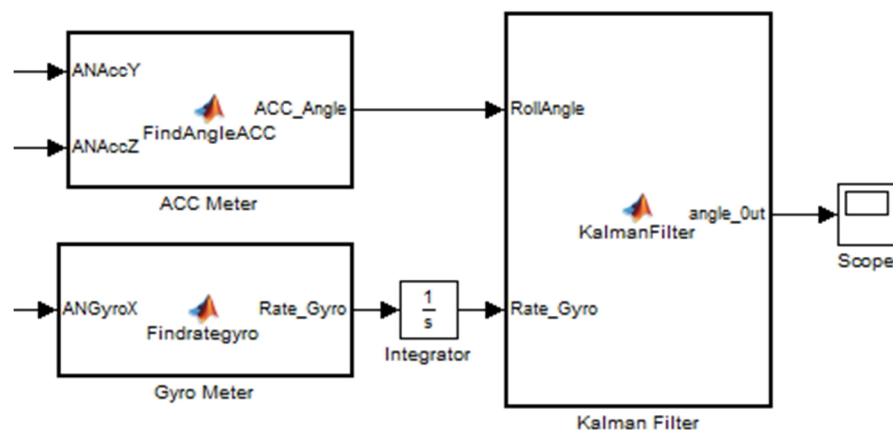
H คือ สมการถ่ายโอนของระบบ

P_k คือ ความแปรปรวนของระบบที่เกิดจากเวลาใหม่

จะได้สมการปรับค่าความเปลี่ยนแปลงทั้งหมดดังนี้

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_k = (1 - \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}) \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_k \quad (3-36)$$

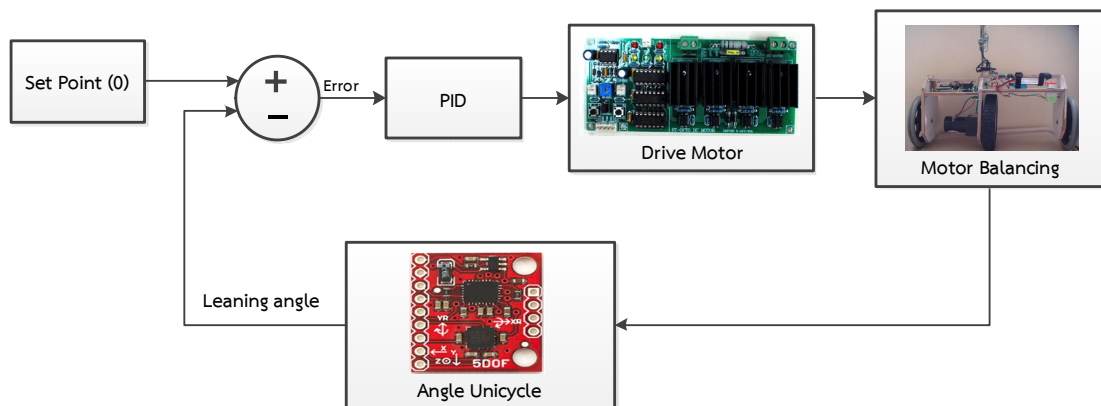
และเมื่อนำสมการทั้งหมดที่กล่าวมาตั้งแต่การรับค่าเซนเซอร์ จนเข้าสู่สมการKalman Filter ไปเขียนลงสู่โปรแกรมMATLAB™ จะได้ดังภาพที่ 3.22 สมการKalman FilterบนโปรแกรมMATLAB™



ภาพที่ 3.22 สมการKalman FilterบนโปรแกรมMATLAB™

3.8 การเขียนตัวควบคุมด้วยPID Control

การควบคุมการรักษาสมดุลของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวยังรักษาสมดุลแนวตรงจะต้องให้ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวยังรักษาสมดุลแนวตรงสามารถรักษาค่ามุมที่ศูนย์องศาได้ โดยนำค่ามุมศูนย์ไปลบกับค่าที่เซนเซอร์ประมวลผลออกเป็นค่ามุม จะได้ค่าผิดพลาดจากนั้นส่งค่าผิดพลาดเข้าสู่ตัวควบคุมPID Control แต่จะใช้ตัวควบคุมแบบPI Controlเป็นส่วนมาก จากนั้นตัวควบคุมจะไปปรับค่าของจำนวนPWMที่จ่ายให้กับชุดขับกำลังมอเตอร์เพื่อควบคุมการรักษาสมดุลและจะทำเช่นเดิมวนไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 3.23 โครงสร้างตัวควบคุมแบบPID Control

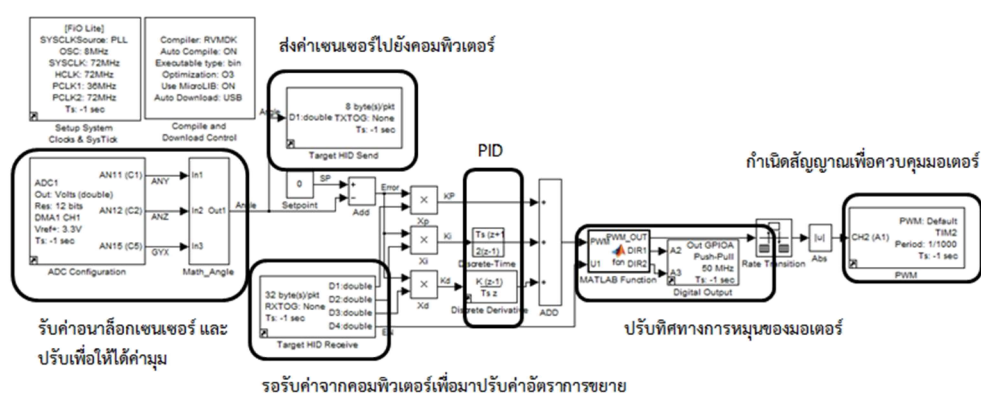


ภาพที่ 3.23 โครงสร้างตัวควบคุมแบบPID Control

3.8.1 วิธีการในการปรับค่าตัวควบคุมของตัวควบคุมPID Control

เนื่องจากระบบของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ(Transfers Function) ของระบบ ขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสถิตแนวตรง เมื่อนำสัญญาณเซนเซอร์มาควบคุมเป็นวงรอบแบบปิด (Close Loop) ด้วยตัวควบคุมแบบPID Controlแล้ว สามารถทำให้เกิดผลตอบสนองของการแกว่ง (Oscillation) ของรูปคลื่นสัญญาณได้ ในที่นี้ผู้จัดทำจึงได้เลือกวิธีการปรับค่าอัตราขยายด้วยวิธีของZiegler-Nichols โดยได้ทำตามขั้นตอนของZiegler-Nicholsดังนี้

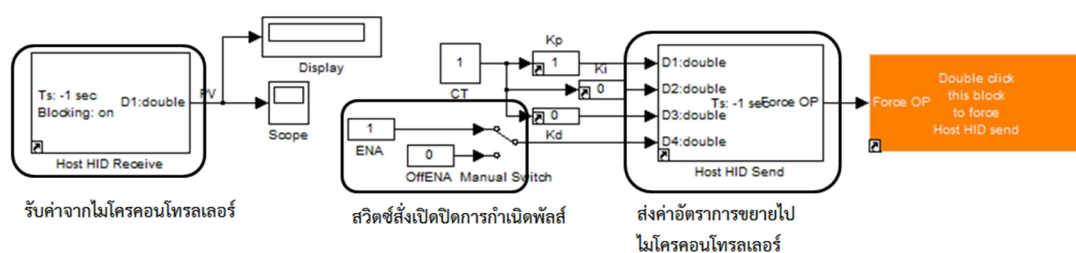
ขั้นตอนที่ 1) ต่อระบบควบคุมให้เป็นวงรอบแบบปิด โดยให้สามารถปรับค่าขึ้นหรือปรับค่าลดลงของตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Control) ได้ โดยจะเขียนโปรแกรมดังภาพที่ 3.24 และภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.24 โปรแกรมตัวควบคุมแบบPID Control บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยภาพที่ 3.24 จะเป็นการเขียนโค้ดโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะเขียนเป็นวงรอบแบบปิดคือ จะรับค่าเซนเซอร์ที่เป็นสัญญาณอนาล็อกจากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเอียงเพื่อมาแปลงค่าให้เป็นค่ามุม เข้าสู่สมการKalman Filterเพื่อให้ได้ค่ามุมที่ดี

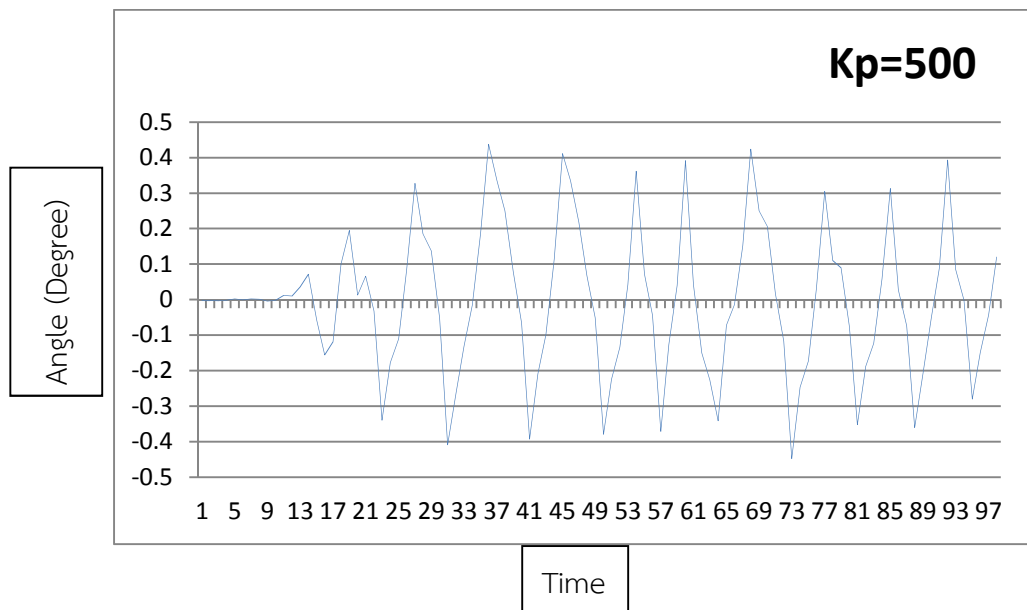
ที่สุด แล้วนำค่ามาลบกับมุมที่ต้องการรักษาสมดุลคือมุมศูนย์เกิดเป็นค่าของความผิดพลาด จากนั้นนำค่าความผิดพลาดไปเข้าตัวคูณเพื่อรอรับค่าจากคอมพิวเตอร์มาปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมทั้งสามตัว ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วน, ตัวควบคุมแบบปริพันธ์และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จากนั้นนำค่าของตัวควบคุมทั้งสามไปรวมกันเพื่อกำหนดสัญญาณPWMนำไปควบคุมมอเตอร์ต่อไป



ภาพที่ 3.25 ชุดการรับค่าและคำสั่งปรับตัวคูณคอนโทรลอยู่บนคอมพิวเตอร์

โดยภาพที่ 3.25 เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อส่งค่าตัวคูณอัตราขยาย เพื่อนำไปปรับตัวควบคุมแบบPID Control และเป็นตัวหยุดฉุกเฉินคือเมื่อส่งค่าหนึ่งจะเป็นการสั่งให้สามารถกำหนดสัญญาณPWMได้แต่เมื่อส่งสัญญาณที่เป็นศูนย์จะเป็นการหยุดการกำเนิดสัญญาณPWM และในโปรแกรมจะมีการรับค่ามุมของเซนเซอร์เข้ามาพล็อตค่ากราฟแบบต่อเนื่องเพื่อดูค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 2) ปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนให้เพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดการส่ายของสัญญาณที่มีความสูงของสัญญาณ(Amplitude) มีค่าที่เท่ากัน ดังภาพที่ 3.26 สัญญาณที่รับค่ามุมเมื่อปรับค่าอัตราการขยายที่ค่าเท่ากับ 500



ภาพที่ 3.26 สัญญาณที่รับค่ามุมเมื่อปรับค่าอัตราขยายที่ค่าเท่ากับ 500

ขั้นตอนที่ 3) บันทึกค่าอัตราขยายที่ป้อนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน($K_p=500$) และคาบเวลาของการแกว่ง ($T=15$)

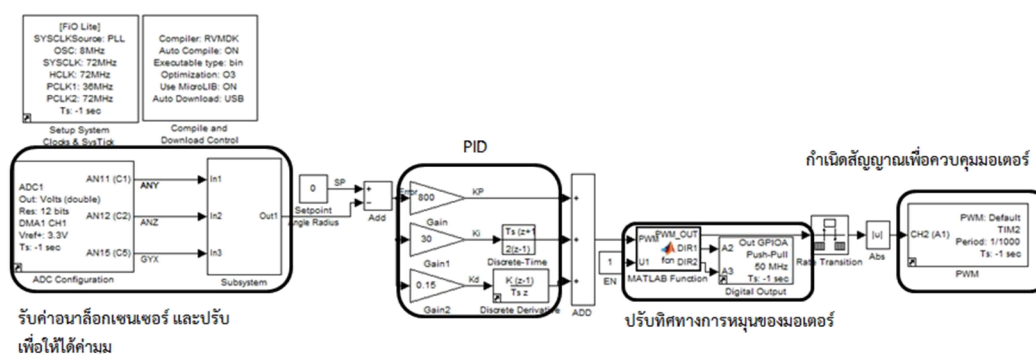
ขั้นตอนที่ 4) นำค่าอัตราขยายและคาบเวลาของการแกว่งตัวที่ได้ ไปเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบดังนี้

ตารางที่ 3-5 ตารางการปรับค่าอัตราขยายด้วยวิธีของZiegler-Nichols

Design Control	
P	$X_p = \frac{500}{0.5} = 1000$
PI	$X_p = \frac{500}{0.45} = 1111.12$ $T_n = 0.85 \times 15 = 12.75$
Design Control	
PID	$X_p = \frac{500}{0.6} = 833.33$ $T_n = 0.5 \times 15 = 30$ $T_d = 0.12 \times 30 = 0.004$

โดยค่าอัตราขยายเมื่อได้ทำตามตารางแล้วสังเกตเห็นว่าค่าอัตราขยายแบบ PID Control มีค่าของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ที่น้อยมากจึงเลือกใช้อัตราขยายแบบ PI Control

โดยนำค่าอัตราการขยายไปใส่ลงบนโปรแกรมเพื่อทดสอบและนำไปเก็บผล เพื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlต่อไป โดยโค้ดในการเขียนโปรแกรมลงบน ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังภาพที่ 3.27 โค้ดโปรแกรมในการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบPID Control



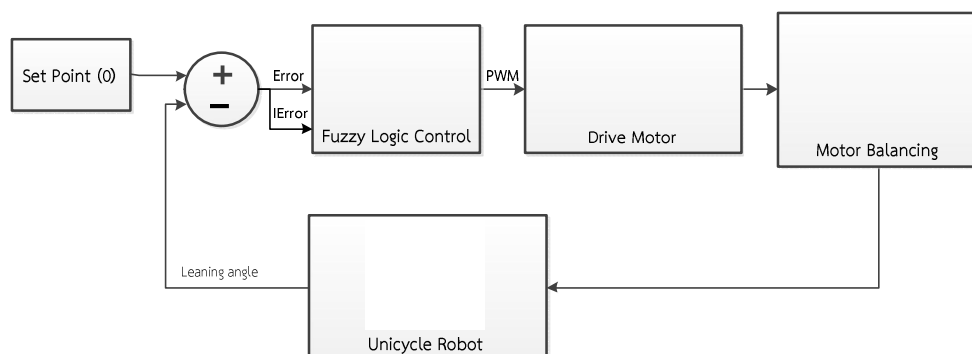
ภาพที่ 3.27 โค้ดโปรแกรมในการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบPID Control

3.9 เขียนตัวควบคุมด้วยแบบFuzzy logic Control

ตัวควบคุมแบบFuzzy logic control เป็นตัวควบคุมที่ใช้เกี่ยวกับสมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณค่าของเอาต์พุตจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลมาก แต่ข้อดีคือจะไม่จำเป็นต้องใช้วิธีที่ยุ่งยากแบบPID Controlที่ไม่ใช้วิธีปรับค่าอัตราการขยายด้วยวิธีของZiegler-Nicholsและตัวควบคุมยังเหมาะสมสำหรับระบบสมการที่ไม่ใช่สมการเชิงเส้นตรง

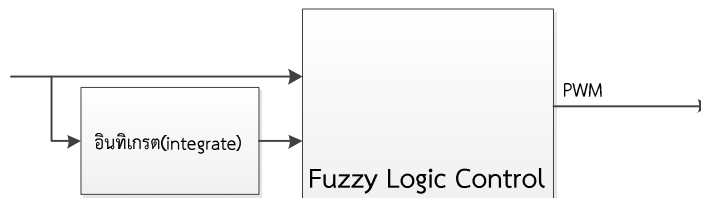
ในการออกแบบเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบPID Control โดยตัวแปรส่วนใหญ่ของตัวควบคุมแบบPID Controlออกแบบด้วยตัวควบคุมแบบPI Controlจึงนำสมการของค่าความผิดพลาด และค่าอินทิเกรตค่าผิดพลาดนำมาเป็นตัวแปรเข้ามาพิจารณาการจ่ายสัญญาณ PWMให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

การควบคุมการรักษาสมดุลของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงจะต้องให้ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงรักษาสมดุลที่ค่ามุมที่ศูนย์องศาได้ โดยนำค่ามุมศูนย์ไปลบกับค่าที่เซนเซอร์ประมวลผลออกเป็นค่ามุม จะได้ค่าผิดพลาดจากนั้นส่งค่าผิดพลาดเข้าไปสู่ตัวควบคุมแบบFuzzy logic control และจะใช้ค่าอินทิเกรตค่าผิดพลาดเข้ามาควบคุมด้วย เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบPI Control จากนั้นตัวควบคุมแบบFuzzy logic control จะปรับค่าจำนวนPWMที่จ่ายให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อควบคุมการรักษาสมดุลและจะทำเช่นเดิมวนไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 3.28 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแบบFuzzy logic control



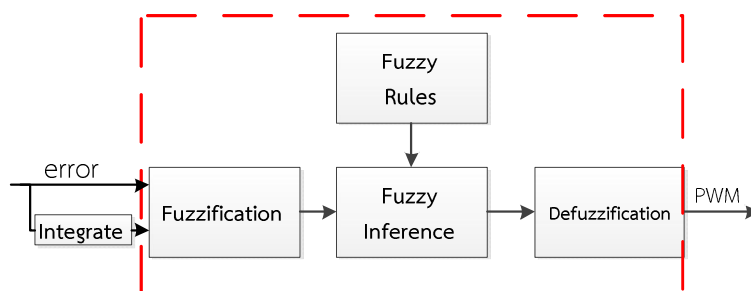
ภาพที่ 3.28 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

เมื่อพิจารณาแล้วตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlรับค่าความผิดพลาดและค่าอินทิเกรตค่าผิดพลาดเข้าตัวควบคุม เพื่อนำไปปรับการสัญญาณPWMมาแก้ไขค่ามุมระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรง ดังนั้น การเลือกรูปแบบของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlจึงเลือกแบบหลายอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต(Multi Input Single Output) ดังภาพที่ 3.29 รูปแบบของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlเป็นแบบหลายอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต(Multi Input Single Output)



ภาพที่ 3.29 รูปแบบของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlแบบหลายอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต(Multi Input Single Output)

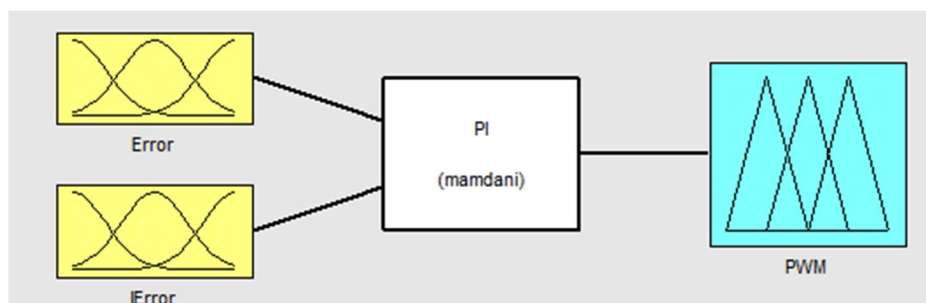
เมื่อเลือกรูปแบบของการทำงานของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlได้แล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlโดยอ้างอิงจากเนื้อหาบทที่ 2 ที่ผ่านมาดังภาพที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control



ภาพที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

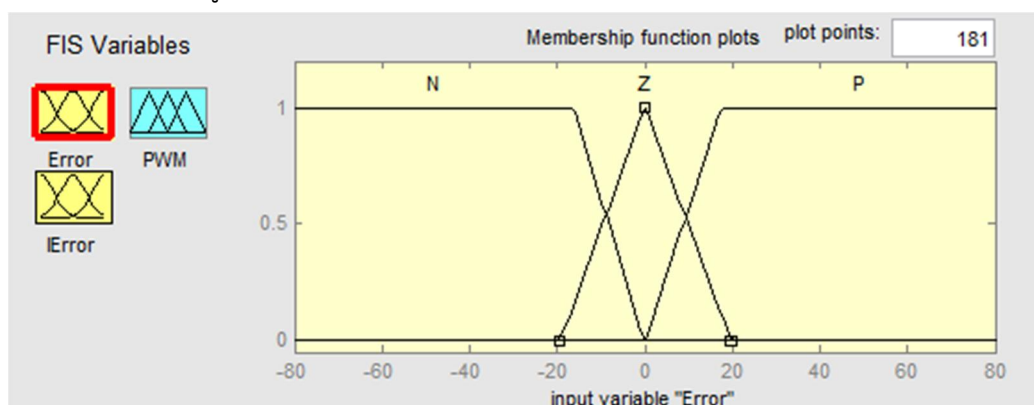
3.9.1 การจัดค่าความเป็นสมาชิก

โดยค่าสัญญาณที่รับด้านอินพุตเข้ามาคือค่าของศูนย์ลบมุมมองศาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น มุมของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมุมตรงที่รับเข้ามามีค่าระหว่าง -90 ถึง 90 แต่พิจารณาแล้วว่าที่มุม -90 น่าจะเป็นมุมที่ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมุมตรงเกิดการล้มลงพอดี จึงปรับค่าอินพุตให้อยู่ระหว่าง -80 ถึง 80 และค่าของการอินทิเกรต คือ การหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างช่วงลบและบวก ถ้าพื้นที่ใดมากกว่าก็จะเกิดการสะสมของความผิดพลาดนั้นสะสม ดังนั้นจึงปรับให้อยู่ในช่วงระหว่าง -40 ถึง 40 ดังภาพที่ 3.31 รูปแบบการตั้งค่าตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlบนโปรแกรมMATLAB™



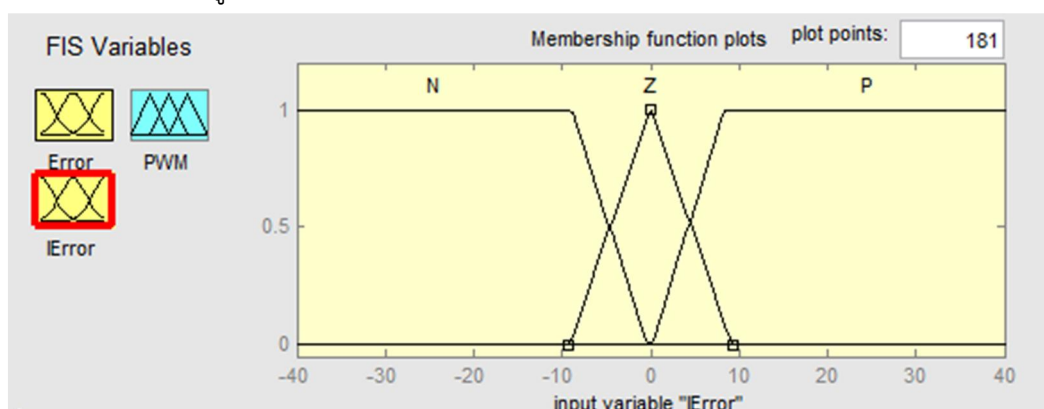
ภาพที่ 3.31 รูปแบบการตั้งค่าตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlบนโปรแกรมMATLAB™

ต่อไปเป็นการจัดกลุ่มของค่าสัญญาณความผิดพลาดที่รับเข้ามา โดยจะกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ Negative ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ N มีค่าตั้งแต่ -80 ถึง 0, Zero ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ Z มีค่าตั้งแต่ -20 ถึง 20, Positive ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ P มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 80 โดยค่าที่กำหนดทั้งหมดสามารถแสดงบนโปรแกรมโปรแกรมMATLAB™ ได้ดังภาพที่ 3.32 การกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาของค่าความผิดพลาดบนโปรแกรมMATLAB™



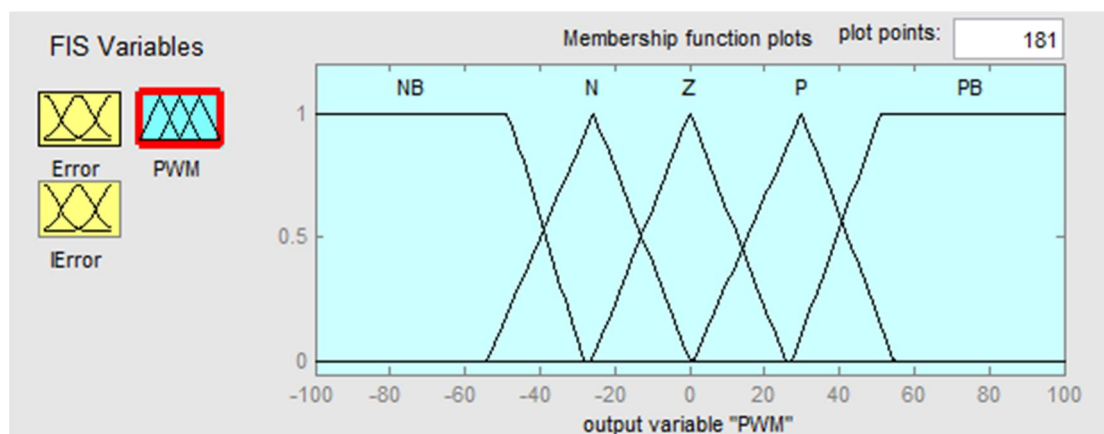
ภาพที่ 3.32 การกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาของค่าความผิดพลาดบนโปรแกรมMATLAB™

ต่อไปเป็นการจัดกลุ่มของค่าอินทิเกรตสัญญาณค่าความผิดพลาดที่รับเข้า โดยจะกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ Negative ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ N มีค่าตั้งแต่ -40 ถึง 0, Zero ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ Z มีค่าตั้งแต่ -10 ถึง 10, Positive ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ P มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 40 โดยค่าที่กำหนดทั้งหมดสามารถแสดงบนโปรแกรมโปรแกรมMATLABTMได้ดังภาพที่ 3.33 การกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาของค่าอินทิเกรตความผิดพลาดบนโปรแกรมMATLABTM



ภาพที่ 3.33 การกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาของค่าอินทิเกรตความผิดพลาดบนโปรแกรมMATLABTM

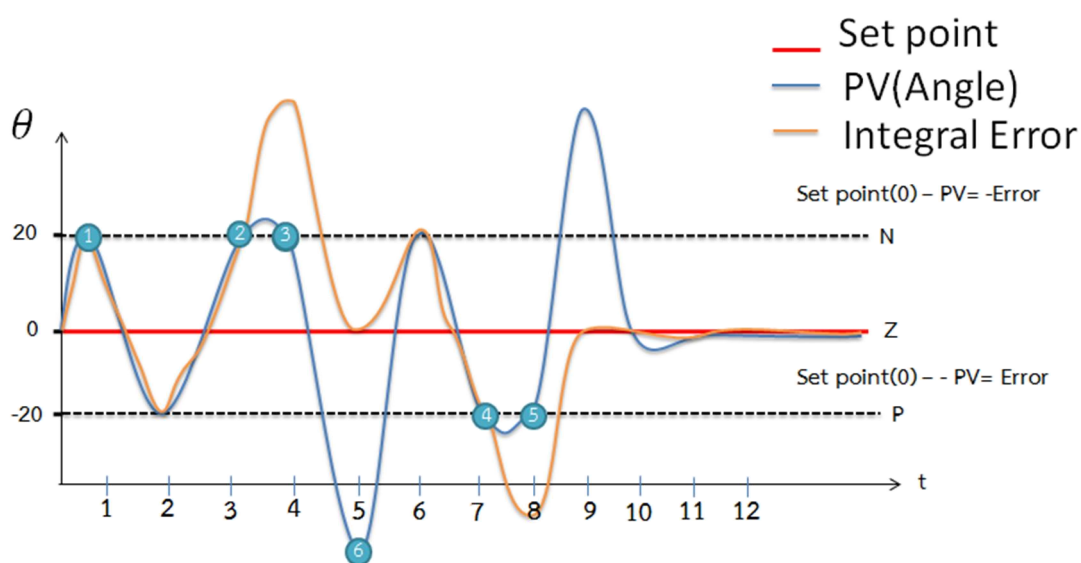
ต่อไปเป็นการจัดกลุ่มของค่าสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณPWMโดยจะปรับตั้งแต่ 0-100 โดยจะกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาทั้งหมด 5 กลุ่ม ได้แก่ Negative Big ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ NB มีค่าตั้งแต่ -100 ขึ้นไป ถึง 25, Negative ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ N มีค่าตั้งแต่ -60 ถึง 0, Zero ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ Z มีค่าตั้งแต่ -25 ถึง 25, Positive ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ P มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 60, Positive Big ตัวสัญลักษณ์ย่อคือ PB มีค่าตั้งแต่ 25 ถึง 100 ขึ้นไปดังภาพที่ 3.34 สมาชิกกลุ่มสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณPWMไปขับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์



ภาพที่ 3.34 การกำหนดตัวแปรในรูปแบบเชิงภาษาของคลื่นสัญญาณPWMบนโปรแกรมMATLABTM

3.9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

การตั้งกฎการทำงานของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlจะต้องพิจารณาค่าอินพุต และทราบถึงวิธีการทำให้ค่ามุมเกิดการกลับมายังตำแหน่งมุมศูนย์เดิมก่อนด้วยซึ่งกล่าวในบทที่ 2 เรื่องของทฤษฎีของการรักษาสมดุล ในการตั้งกฎจะพิจารณาค่าความผิดพลาดที่กำหนดขึ้นมากับ ค่าเวลา และเมื่อนำค่าผิดพลาดที่กำหนดขึ้นมาทำการอินทิเกรตจะให้ผลกราฟดังภาพที่ 3.35 การกำหนดค่าความผิดพลาดเพื่อนำมาวิเคราะห์พิจารณากฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control



ภาพที่ 3.35 การกำหนดค่าความผิดพลาดเพื่อนำมาวิเคราะห์พิจารณา

กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

เมื่อพิจารณา จุดที่ 1 ค่ามุมของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงมีการเคลื่อนที่ล้มไปทางด้านหน้า แต่ค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Negative เพราะค่าความผิดพลาดเกิดจากค่ามุมศูนย์ลบกับค่าผลที่ได้มาจากค่ามุมที่ได้จากเซนเซอร์ เมื่อพิจารณาค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดแล้วพิจารณาของจุดที่ 1 ดังสมการดังนี้

$$\int_0^1 -20dt + C \quad (3-37)$$

โดยเมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$\int_0^1 -20dt + C = -20t \Big|_0^1 + C$$

$$-20t \Big|_0^1 + C = -20 + 0 = -20$$

เมื่อพิจารณา จุดที่ 2 และ จุดที่ 3 ค่ามุมของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรงมีการเคลื่อนที่ลึ้มไปทางด้านหน้าเป็นระยะเวลานาน แต่ค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Negative เพราะค่าความผิดพลาดเกิดจากค่ามุมศูนย์ลบกับค่าผลที่ได้มาจากค่ามุมที่ได้จากเซนเซอร์ เมื่อพิจารณาค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดแล้วพิจารณาได้ดังนี้

$$\int_3^4 -20dt + C \quad (3-38)$$

โดยเมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_3^4 -20dt + C &= -20t \Big|_3^4 + C \\ -20t \Big|_3^4 + C &= -20 + -20 = -40 \end{aligned}$$

ทำให้ค่าความผิดพลาดเกิดการสะสม เพราะ เกิดการบวกค่าความผิดพลาดเดิมเข้าไป

เมื่อพิจารณา จุดที่ 4 และ จุดที่ 5 ค่ามุมของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรงมีการเคลื่อนที่ลึ้มไปทางด้านหลังเป็นระยะเวลานาน แต่ค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Positive (P) เพราะค่าความผิดพลาดเกิดจากค่ามุมศูนย์ลบกับค่าผลที่ได้มาจากค่ามุมที่ได้จากเซนเซอร์ เมื่อพิจารณาค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดแล้วพิจารณาได้ดังนี้

$$\int_7^8 20dt + C \quad (3-39)$$

โดยเมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_7^8 20dt + C &= 20t \Big|_7^8 + C \\ 20t \Big|_7^8 + C &= 20 + 20 = 40 \end{aligned}$$

ทำให้ค่าความผิดพลาดเกิดการสะสม เพราะ เกิดการบวกค่าความผิดพลาดเดิมเข้าไป

เมื่อพิจารณา จุดที่ 3 และ จุดที่ 6 ค่ามุมของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสสมดุลแนวตรงมีการเคลื่อนที่ เพื่อให้เกิดการกลับของค่ามุมอย่างมากแสดงว่ามีการจ่ายค่าของแรงดันมากๆ แต่เมื่อพิจารณาค่าของค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดแล้วของค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดมีค่ากลับศูนย์ตามไปด้วย โดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\int_4^5 40dt + C \quad (3-40)$$

โดยเมื่อแทนค่าลงสมการจะได้ดังนี้

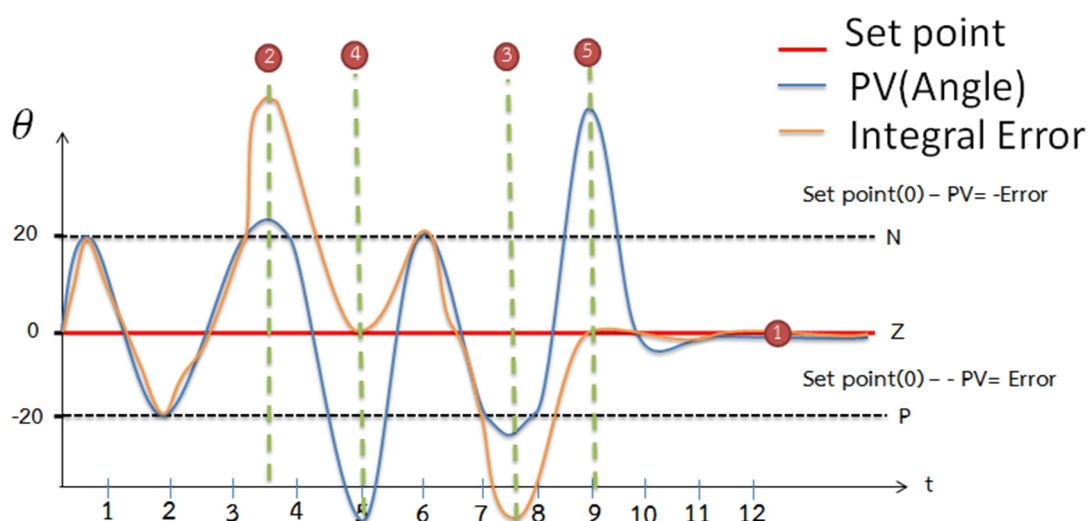
$$\int_4^5 40dt + C = 40t \Big|_4^5 + C$$

$$40t \Big|_4^5 + C = 40 + -40 = 0$$

เนื่องจากค่าของความผิดพลาดมีค่าเดิมที่มากอยู่แล้วเมื่อมุมเกิดการย้อนกลับด้วยความแรงทำให้ค่าของความผิดพลาดสะสมลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อให้ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมุมตรงสามารถกลับสู่มุมศูนย์ได้ดีขึ้น จึงต้องทำให้ค่าความผิดพลาดของค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดกลับเป็นศูนย์ตลอดจึงนำค่าความผิดพลาดที่สะสมขึ้นมาและค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดไปพิจารณา กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlได้

3.9.3 กฎตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control จะพิจารณาจากค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาด โดยจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสะสมว่าเป็นระยะเวลาที่มีเวลานานทำให้ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมุมตรงเกิดการโน้มไประยะมากเนื่องจากระยะเวลา ดังนั้นเมื่อทราบถึงการอินทิเกรตจากค่าความผิดพลาดแล้วสามารถนำมาเขียนเป็นภาพได้ดังภาพที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดกับค่าของการอินทิเกรตความผิดพลาดของมุม



ภาพที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดกับค่าของการอินทิเกรตความผิดพลาดของมุม

เมื่อพิจารณา จุดที่ 1 ค่านุมได้เข้าสู่มุมที่ต้องการแล้ว คือมุมศูนย์ตกอยู่ในช่วง Zero และค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Zero จึงไม่ต้องจ่ายสัญญาณPWM ในช่วงของ Zero

เมื่อพิจารณา จุดที่ 2 ค่าความผิดพลาดของค่ามุมตกอยู่ในช่วง Negative และค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Negative เมื่อพิจารณาแล้วค่ามุมระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงล้มไปทางด้านหน้า จะต้องจ่ายสัญญาณPWMช่วงของ Positive แต่ต้องการลดค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดสะสม จึงจ่ายสัญญาณPWM ช่วงของ Positive Big

เมื่อพิจารณา จุดที่ 3 ค่าความผิดพลาดของค่ามุมตกอยู่ในช่วง Positive และค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Positive เมื่อพิจารณาแล้วค่ามุมระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงล้มไปทางด้านหลัง จะต้องจ่ายสัญญาณPWMช่วงของ Negative แต่ต้องการลดค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดสะสม จึงจ่ายสัญญาณPWM ช่วงของ Negative Big

เมื่อพิจารณา จุดที่ 4 ค่าความผิดพลาดของค่ามุมตกอยู่ในช่วง Negative และค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Zero เมื่อพิจารณาแล้วระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงไม่เกิดความผิดพลาดสะสมแล้ว แต่ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงยังเกิดการล้มไปทางด้านหลังอยู่ จึงต้องจ่ายสัญญาณPWM ช่วงของ Negative

เมื่อพิจารณา จุดที่ 5 ค่าความผิดพลาดของค่ามุมตกอยู่ในช่วง Positive และค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดตกอยู่ในช่วง Zero เมื่อพิจารณาแล้วระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงไม่เกิดความผิดพลาดสะสมแล้ว แต่ระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงยังเกิดการล้มไปทางด้านหน้าอยู่ จึงต้องจ่ายสัญญาณPWM ช่วงของ Positive

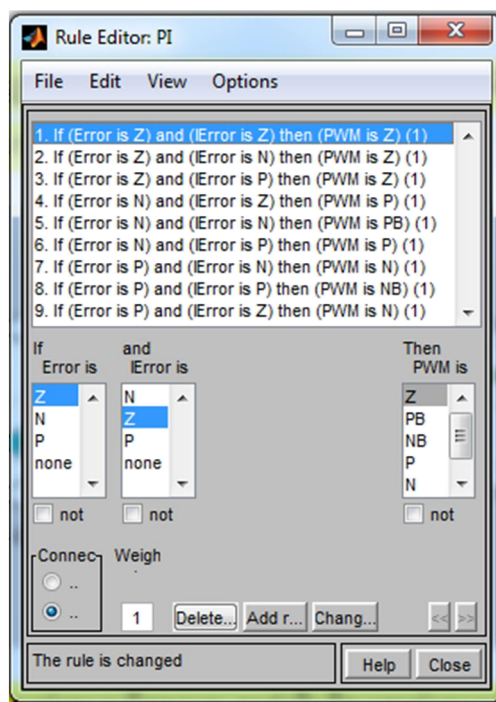
โดยจุดอื่นที่นอกเหนือจากจุดดังกล่าวจะพิจารณาตามค่าของมุมล้มของระบบขับเคลื่อนล้อเดียวรักษาสมดุลแนวตรงเป็นหลัก คือเมื่อมุมเกิดการล้มไปทางด้านหน้า จะจ่ายสัญญาณPWMช่วงของ Positive เมื่อมุมเกิดการล้มไปทางด้านหลัง จะจ่ายสัญญาณPWM ช่วงของ Negative และเมื่อมุมเกิดการเข้าสู่มุมที่ต้องการหรือมุมศูนย์จะจ่ายสัญญาณPWM ในช่วงของ Zero

เมื่อได้กฎครบแล้วจึงนำกฎต่างๆมาเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3-6 ตารางกฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

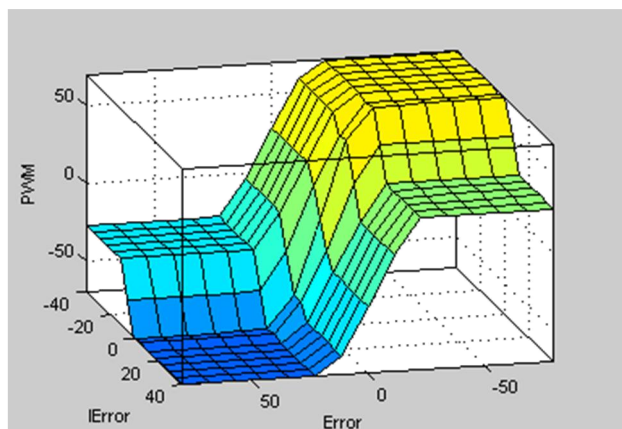
Error \ I Error	1: $\int_0^1 -20dt = -20$ N	2: 0 Z	3: $\int_1^2 20dt = 20$ P
N 1: $0-20 = -20$	2: PB	5: P	P
Z 2: 0	Z	1: Z	Z
P 3: $0+20 = 20$	N	4: N	3: NB

เมื่อได้กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlครบแล้ว เมื่อนำกฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlไปใส่ในโปรแกรมMATLABTM ดังภาพที่ 3.37 กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlบนโปรแกรมMATLABTM



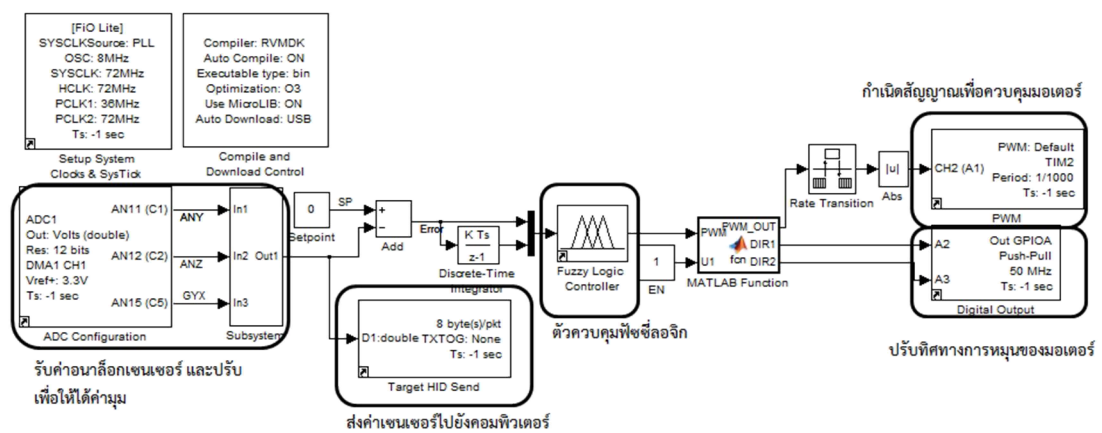
ภาพที่ 3.37 กฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlบนโปรแกรมMATLABTM

เมื่อพิจารณากฎครบแล้วจะได้ภาพของความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดในรูปแบบเชิงกราฟดังภาพที่ 3.38 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดในรูปแบบเชิงกราฟ



ภาพที่ 3.38 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าอินทิเกรตค่าความผิดพลาดในรูปแบบเชิงกราฟ

เมื่อพิจารณาได้ถึงกฎของตัวควบคุมแบบFuzzy logic controlแล้วจึงนำกฎไปโหลดเขียนโค้ดโปรแกรมMATLABTMเพื่อโหลดโปรแกรมเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อบันทึกผลในบทต่อไป โดยการเขียนโคโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 3.39 โค้ดโปรแกรมการเขียนตัวควบคุมแบบFuzzy logic control



ภาพที่ 3.39 โค้ดโปรแกรมการเขียนตัวควบคุมแบบFuzzy logic control

