

LAB 1: Sensors

Name

- | | | |
|----------------|-----------------|-------------|
| • นายคุณันต์ | วาสุเทพรังสรรค์ | 67340500004 |
| • นางสาวญาณิศา | รอดเจริญ | 67340500009 |
| • นายธนดล | พูลสระคู | 67340500017 |

Objectives

- เพื่อให้ได้ศึกษา Sensor ประเภทต่าง ๆ ทั้งหลักการทำงาน และคุณสมบัติของ Sensor เหล่านั้น
- เพื่อให้ได้ศึกษา Potentiometer มีความเป็นเชิงเส้นในรูปแบบต่างๆ และการออกแบบวงจร Schmitt Trigger ในการเลือก Upper Lower Threshold
- เพื่อให้ได้ศึกษาการทำงานและลักษณะสัญญาณ Incremental Encoder รวมถึงการใช้ Wrap-around และ Homing Sequence ในการเขียนโปรแกรม
- เพื่อให้ได้ศึกษาหลักการทำงาน Magnetic Sensor ความสัมพันธ์ของ Magnetic Flux Density และสัญญาณ Output และ Magnetic Shielding
- เพื่อให้ได้ศึกษา Load Cell ว่าทำงานอย่างไร การหาค่า Gain ที่เหมาะสมที่ทำให้ Load Cell มีความแม่นยำ และวิเคราะห์สาเหตุของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้

1. Potentiometer

การทดลองที่ 1 Potentiometer

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Potentiometer ชนิดที่ต่างกัน
2. เพื่อคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น, ความเป็นเชิงเส้น, และการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อระยะทางหรือมุมการหมุนของ Potentiometer
3. เพื่อระบุและทำความเข้าใจ ชนิดของ Potentiometer แต่ละประเภท

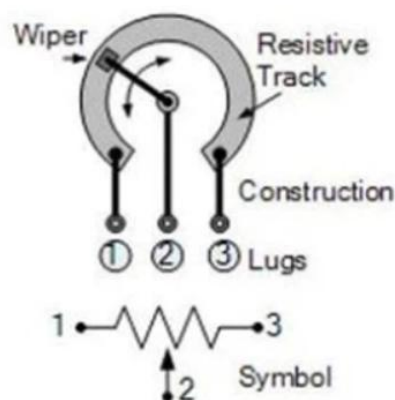
สมมติฐาน

เมื่อระยะทางหรือองศาของ Potentiometer เปลี่ยนไป ค่าแรงดันขาออกจะมีค่าเปลี่ยนไปตามชนิดของ Potentiometer

ตัวแปร

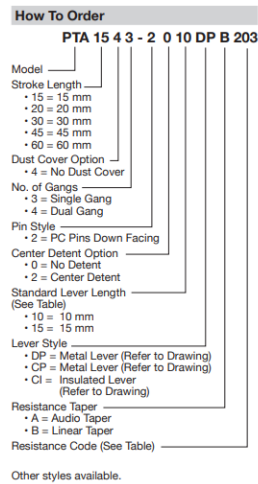
1. ตัวแปรต้น:
 - อัตราส่วนของระยะทางที่เพิ่มขึ้นของ Potentiometer แต่ละตัวบน PotenXplorer ได้แก่ Potentiometer Rotary 3 ตัว และ Potentiometer Linear 2 ตัว ครึ่งละ 10% ของระยะทางทั้งหมด
2. ตัวแปรตาม:
 - แรงดันไฟฟ้า
 - แนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไป
3. ตัวแปรควบคุม:
 - เริ่มการทดลองที่ 0 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

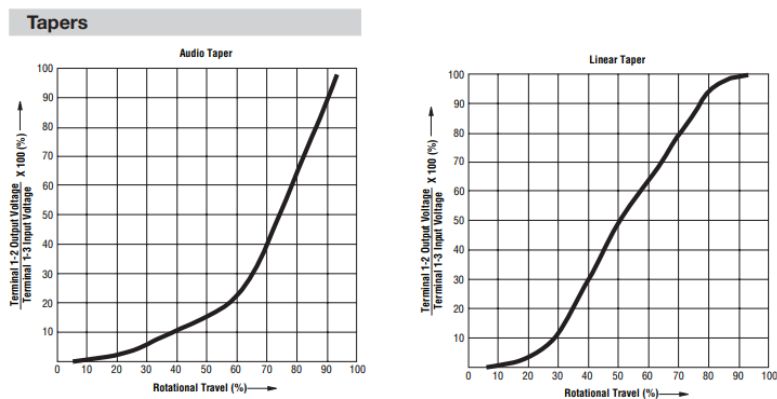


รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของ Potentiometer

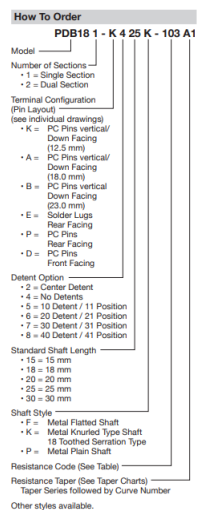
เมื่อหมุนแกนของ Potentiometer ตัว Wiper (ขา 2) จะเลื่อนไปบนแถบความต้านทาน (Resistive Track) ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้ระหว่าง ขา 2 กับ ขา 1 (หรือ ขา 2 กับ ขา 3) เปลี่ยนแปลงไป



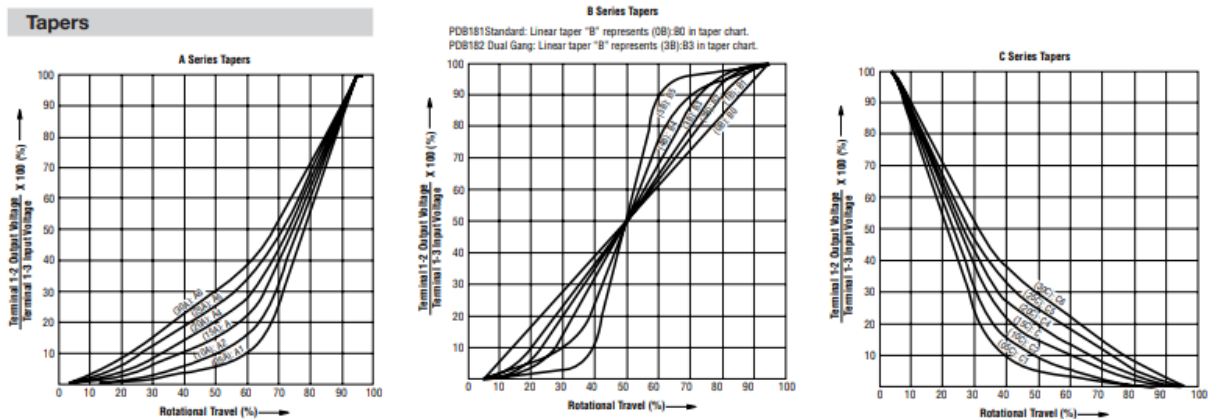
รูปที่ 2 ซี่งรุ่นของ Linear Potentiometer จะเห็น Resistance Taper บอกความเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3 แสดงความเป็นเชิงเส้นของ Linear Potentiometer ของแบบ Linear และ Audio (Log)



รูปที่ 4 ซี่งรุ่นของ Rotary Potentiometer จะเห็น Resistance Taper บอกความเป็นเชิงเส้น



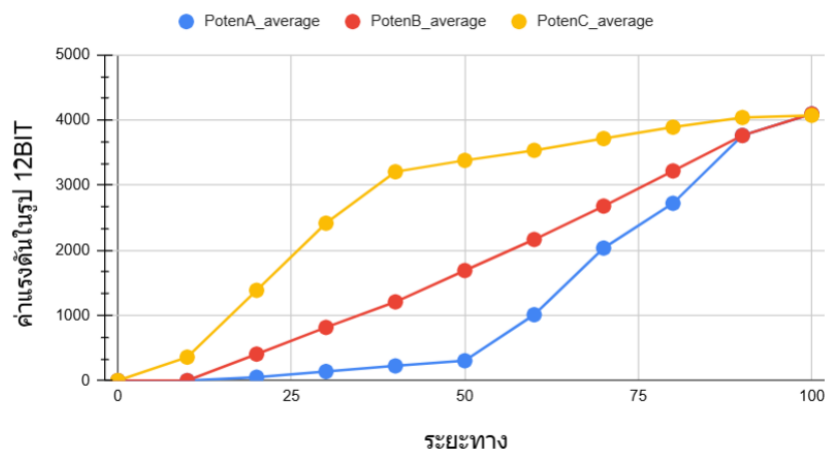
รูปที่ 5 แสดงความเป็นเชิงเส้นของ Rotary Potentiometer ของแบบ Type A B และ C

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เลือก Potentiometer ที่จะทดลอง
2. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนระยะทางทีละ 10% ของระยะทางทั้งหมด
3. เก็บค่าที่ได้จาก Simulink โดยใช้ Moving Average ใน Simulink เพื่อหาค่าเฉลี่ยกรอกลงใน Sheet โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับแต่ละตัวบน PotenXplorer
4. เมื่อทดลองเสร็จ plot graph และวิเคราะห์ประเภทของเชิงเส้น

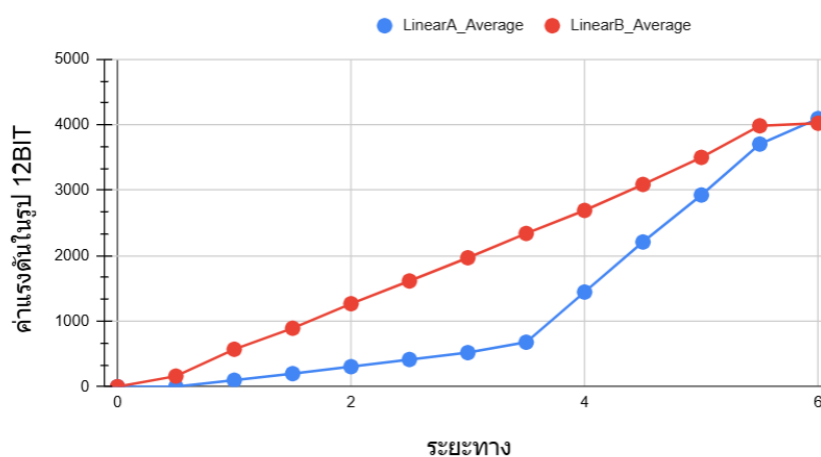
ผลการทดลอง

Potentiometer Rotary



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง Potentiometer Rotary ของแต่ละตัวบน PotenXplorer

Potentiometer Linear



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง Potentiometer Linear ของแต่ละตัวบน PotenXplorer

สรุปผลการทดลอง

ค่าได้จากการหมุนมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในรูป 12-bit ที่แตกต่างกันแต่ละชนิดของ Potentiometer type A, B, และ C

1. Potentiometer แบบ Rotary

- Potentiometer A: A Series คือ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์แบบ Log
- Potentiometer B: B series คือ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์แบบ Linear
- Potentiometer C: C series คือ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์แบบ Anti log

2. Potentiometer แบบ Linear

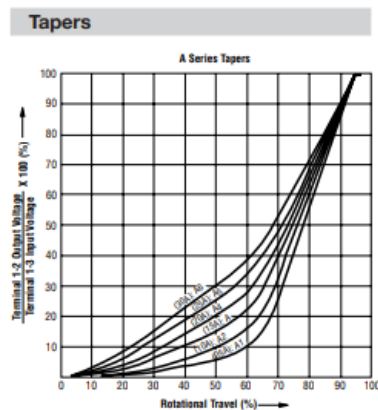
- Potentiometer A: Audio คือ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์แบบ Log
- Potentiometer B: Linear คือ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์แบบ Linear

อภิปรายผล

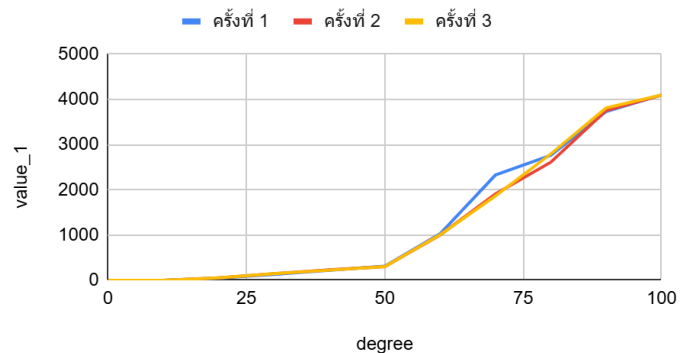
1. Potentiometer Rotary

- Rotary A Type A: log

เนื่องจากแนวโน้มของกราฟ คือ ช่วงแรกความชันค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อระยะทางผ่านไป 50% ของระยะทางทั้งหมดความชันสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของกราฟแบบ log ตรงกับรุ่น PDB181-K420K-103A2 จากการทดลองกราฟที่ออกมามีแนวโน้มคล้าย Datasheet



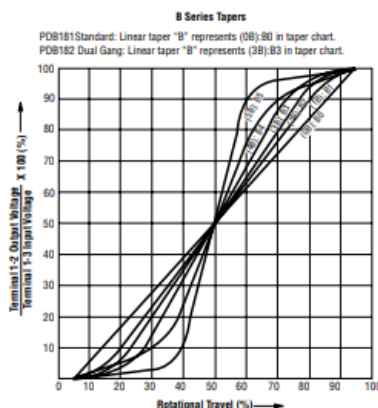
PotenA กับ degree



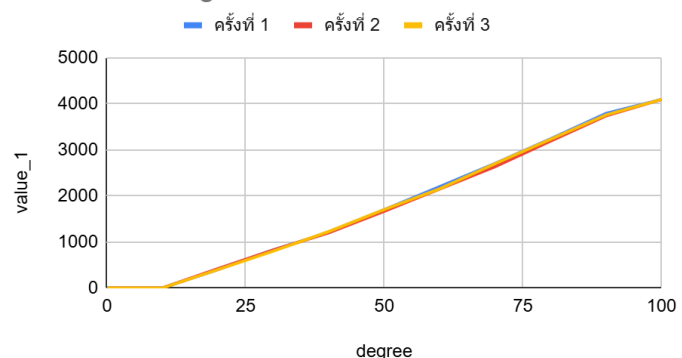
รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลจากการทดลอง Rotary Potentiometer A และ Datasheet Series A Taper

- Rotary B Type B: Linear

เนื่องจากแนวโน้มของกราฟ คือ ตลอดช่วงระยะทางที่เคลื่อนที่ไป ความชันมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นลักษณะของกราฟแบบ Linear ตรงกับรุ่น PDB181-K420K-103B จากการทดลองกราฟที่ออกมามีแนวโน้มคล้าย Datasheet



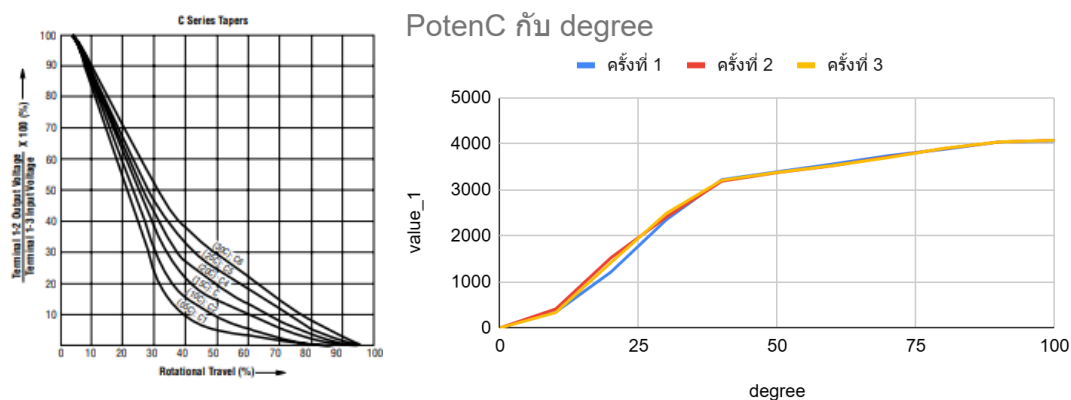
PotenB กับ degree



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลจากการทดลอง Rotary Potentiometer B และ Datasheet Series B Taper

- Rotary C Type C: Anti log

เนื่องจากแนวโน้มของกราฟ คือ ช่วงแรกความชันค่อนข้างสูง แต่เมื่อระยะทางผ่านไป 40% ของระยะทางทั้งหมดความชันต่ำลง ซึ่งเป็นลักษณะของกราฟแบบ Antilog ตรงกับรุ่น PDB181-K420K-103C จากการทดลองกราฟที่ออกมามีแนวโน้มคล้าย Datasheet

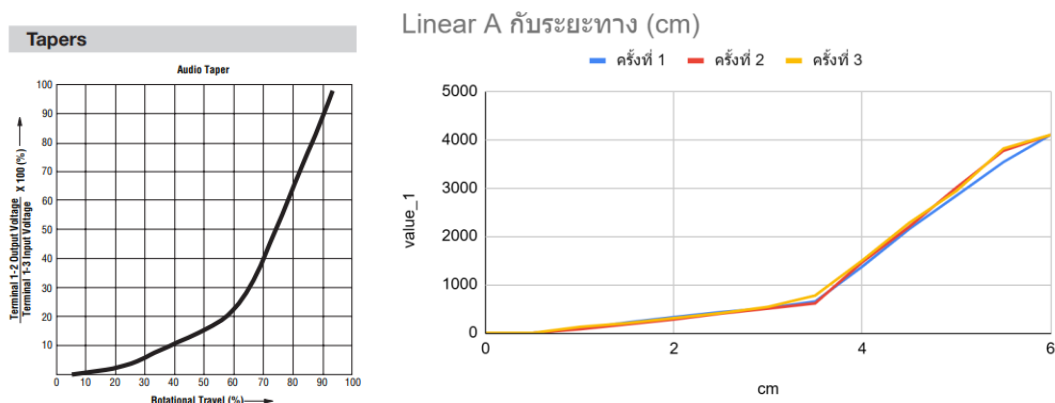


รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลจากการทดลอง Rotary Potentiometer C และ Datasheet Series C Taper

2. Potentiometer Linear

- Linear A Type A: log

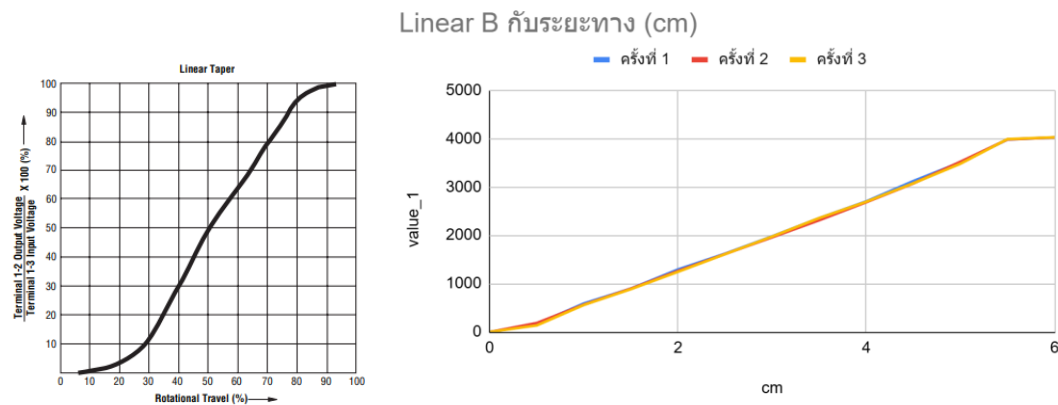
เนื่องจากแนวโน้มของกราฟ คือ ช่วงแรกความชันค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อระยะทางผ่านไป 50% ของระยะทางทั้งหมดความชันสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของกราฟแบบ log ตรงกับรุ่น PTA6043-2015DPA103 จากการทดลองกราฟที่ออกมามีแนวโน้มคล้าย Datasheet



รูปที่ 11 เปรียบเทียบผลจากการทดลอง Linear Potentiometer A และ Datasheet Audio Taper

- Linear B Type B: Linear

เนื่องจากแนวโน้มของกราฟ คือ ตลอดช่วงระยะทางที่เคลื่อนที่ไป ความชันมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นลักษณะของกราฟแบบ Linear ตรงกับรุ่น PTA6043-2015DPB103 จากการทดลองกราฟที่ออกมา มีแนวโน้มคล้าย Datasheet



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลจากการทดลอง Rotary Potentiometer B และ Datasheet Linear Taper

ข้อเสนอแนะ

- ระวังระดับในการต่อขั้วบวกและขั้วลบที่ Potentiometer ให้มากขึ้น

อ้างอิง

<https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PDB18.pdf>

<https://th.mouser.com/datasheet/3/40/1/pta.pdf>

<https://th.cghalljoystick.com/news/industrial-operating-joystick-potentiometer-pr-57641022.html>

การทดลองที่ 2 การออกแบบ Schmitt Trigger

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการและการออกแบบวงจร Schmitt Trigger
2. เพื่อออกแบบและสร้างวงจร Schmitt Trigger ใน Simulink และสามารถกำหนดค่า Upper/Lower Threshold ที่เหมาะสมได้
3. เพื่อให้วงจร Schmitt Trigger สามารถแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ที่แปรผันตามสัญญาณ Input ได้

สมมติฐาน

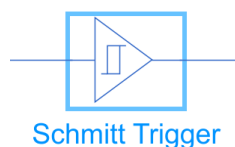
วงจร Schmitt Trigger ที่ออกแบบได้ควรมีค่า Threshold ที่ทำให้เห็นถึงสัญญาณที่ออกมาเป็นค่า Digital ที่มีช่วง HIGH และ LOW ตาม Threshold ที่กำหนด และสามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลง step ได้อย่างชัดเจนและ Real Time

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ค่า Upper/Lower Threshold ที่กำหนดให้ Block Schmitt Trigger ใน Simulink
 - Potentiometer แบบ Linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่า HIGH และ LOW ของสัญญาณ
 - ช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ
3. ตัวแปรควบคุม:
 - เริ่มการทดลองที่ 0 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schmitt Trigger เป็น Block ใน Simulink ที่แสดงพฤติกรรมของ Schmitt Trigger โดยจะให้ค่า HIGH เมื่อ Input มากกว่า High level input voltage และจะให้ค่า LOW เมื่อ Input น้อยกว่า Low level input voltage



รูปที่ 13 Block Schmitt Trigger ใน Simulink

Schmitt Trigger

Auto Apply

| Settings | Description | | | |
|--------------------|---------------------------|-------|----|--|
| NAME | | VALUE | | |
| Inputs | | | | |
| > | Low level input voltage | 1.32 | V | |
| > | High level input voltage | 1.98 | V | |
| | Average input capacitance | 5 | pF | |
| Outputs | | | | |
| Initial Conditions | | | | |

รูปที่ 14 การหาค่า Threshold สำหรับ Schmitt Trigger

โดยตั้ง Lower Threshold ที่ 40 % และ Upper Threshold 60 % เพื่อที่จะแสดงให้เห็นช่วงค่า Hysteresis ระหว่าง 40%-60% เพื่อป้องกันการสั่น

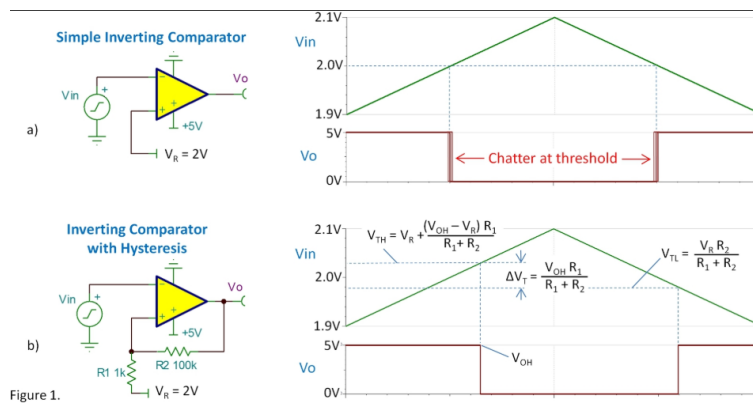


Figure 1.

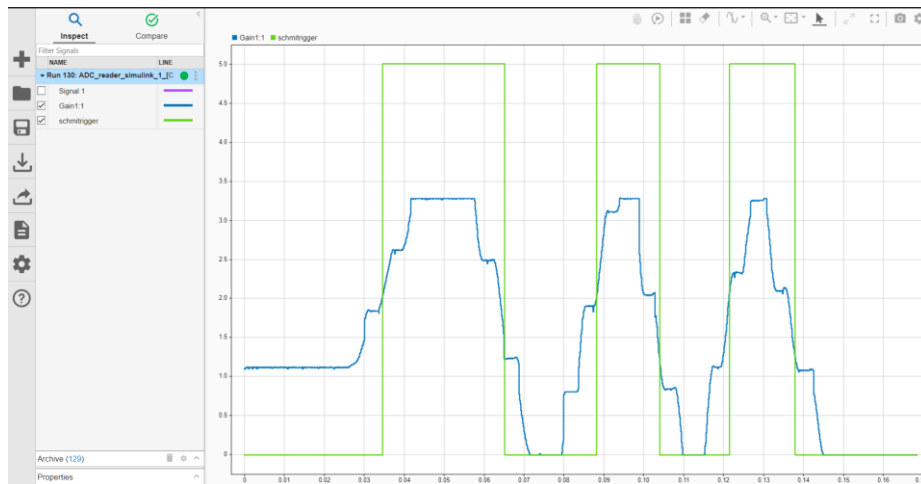
รูปที่ 15 แสดงอาการ Chatter

เกิดจากสัญญาณไม่นิ่งเกิดการแกว่งและ Threshold Upper และ Lower มีค่าใกล้กันจะเห็นค่าที่ได้ออกมาตามรูป ซึ่งส่งผลต่อสัญญาณที่ได้ออกมาในรูปแบบที่ไม่ต้องการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เลือก Potentiometer ที่จะทดลอง
2. ทำการทดลองโดยการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 100% ของระยะทางทั้งหมด
3. เมื่อทดลองเสร็จ plot graph และวิเคราะห์ประเภทของเชิงเส้น

ผลการทดลอง



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าแรงดันเมื่อผ่านวงจร Schmitt Trigger

สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อแรงดันจาก Signal มากกว่า 1.98 ทำให้ แรงดันที่ผ่านวงจร Schmitt Trigger ทำให้เป็น 5 V
2. เมื่อแรงดันจาก Signal น้อยกว่า 1.32 ทำให้ แรงดันที่ผ่านวงจร Schmitt Trigger ทำให้เป็น 0 V

อภิปรายผล

เมื่อแรงดันจาก Signal น้อยกว่า 1.32 ทำให้ แรงดันที่ผ่านวงจร Schmitt Trigger ทำให้เป็น 0 V เนื่องจาก ค่าปกติอยู่ 5 V ซึ่งจะเป็น 0 V

ข้อเสนอแนะ

- ควรตั้งค่า High level input voltage และ Low level input voltage ที่ไม่ใกล้เคียงกันเพื่อให้ค่าเหมาะสม และสามารถนำไปใช้งานได้

อ้างอิง

https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/thesignal/posts/comparators-what-s-all-the-chatter

<https://th.mouser.com/datasheet/3/40/1/pta.pdf>

<https://www.mathworks.com/help/sps/ref/schmitttrigger.html>

2. Incremental Encoder

การทดลองที่ 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Counting Method

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder และสัญญาณที่อ่านได้
2. เพื่อให้เห็นถึงความละเอียดที่ต่างกันของการวัดองศาด้วยการปรับ Counting Method แต่ละแบบ
3. เพื่อศึกษาการตั้งค่า Incremental Encoder ใน IOC เพื่อให้สามารถอ่านสัญญาณและประมวลผลข้อมูลตำแหน่งหรือความเร็วได้

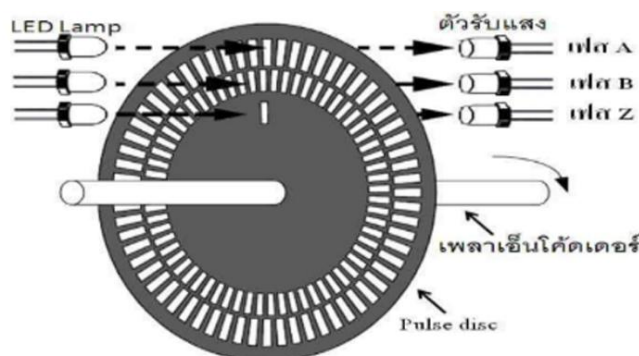
สมมติฐาน

เมื่อเปรียบเทียบค่าจาก Incremental Encoder X1, X2 และ X4 ความละเอียดของค่าจะต่างกัน โดยที่ประเภท X4 จะให้ค่าที่มีความละเอียดสูงที่สุดรองลงมาเป็น X2, X1 ตามลำดับ

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - Counting Method: X1, X2, X4
 - Type of Encoder: Bourns, Incremental
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าองศาที่ได้จากการหมุน
3. ตัวแปรควบคุม:
 - ใช้เวลาและจำนวนครั้งในการหมุนเท่ากัน โดยหมุนรอบเดียวแต่รับค่าจากทั้ง 3 Counting Method ทั้งหมด 3 รอบ
 - Fixed Step: 0.01s

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

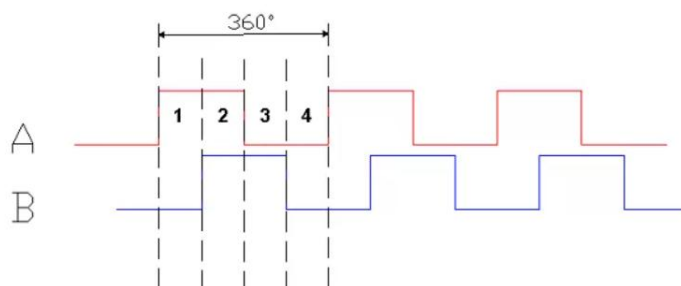


รูปที่ 17 แสดงหลักการทำงานของ Incremental Encoder แบบ Optical

ทำงานโดยใช้ LED (ตัวส่งแสง) ยิงแสงผ่านช่องเล็ก ๆ บน Pulse Disc (จาน Pulse) ที่หมุนตามเพลลา เมื่อแสงทะลุผ่านช่องได้ ตัวรับแสงก็จะตรวจจับแสงนั้นและแปลงเป็นสัญญาณ Digital Pulse 3 ชุด คือ

Phase A และ B: ใช้สำหรับนับสัญญาณ Pulse และบอกทิศทางการหมุน

Phase Z: ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (Index) ซึ่งจะส่ง Pulse แค่ 1 ครั้งต่อการหมุนครบ 1 รอบ



รูปที่ 18 แสดง Counting Method

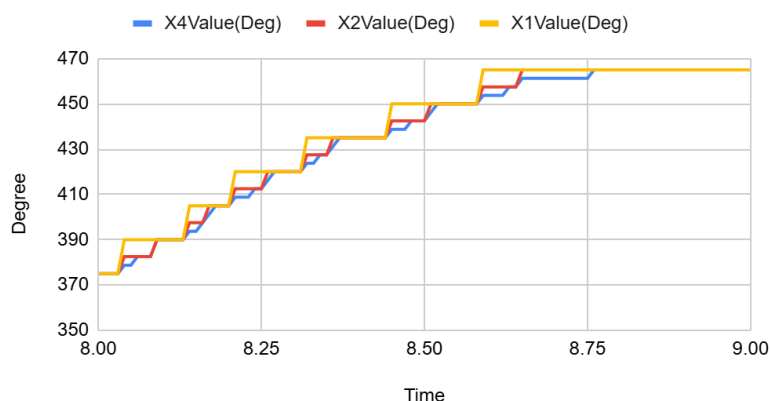
เมื่อใช้ Counting Method ที่เป็น X1 สัญญาณจะถูกนับที่ขอบขาขึ้นเพียง 1 ขา จาก pin อาจเป็น pin A หรือ B ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการตั้งค่า เมื่อใช้ X2 สัญญาณจะถูกนับที่ขอบขาขึ้นและขาลง ที่ pin A หรือ B และเมื่อใช้ X4 สัญญาณจะถูกนับทั้งขอบขาขึ้นและขาลง ที่ pin A และ B ซึ่งจำนวนขอบขาและ pin ส่งผลให้ได้สัญญาณที่มีความละเอียดขึ้น

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เปลี่ยน Encoder Mode และเปลี่ยนค่า Gain ใน Simulink ให้ทุก Counting Method มีค่า Count เมื่อมีการหมุน 1 รอบ เป็น 360 องศา
2. โดยการเปลี่ยนค่า Gain ของ PEC11RE นำมาจาก Datasheet คือ Resolution ของรุ่นนี้เท่ากับ 24 pulse per 360 degree rotation และ AMT103-V นำมาจาก Datasheet คือ Resolution ของรุ่นนี้ซึ่งเลือกโดยนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าที่ใกล้เคียงกับองศาหมุนจริงที่สุดจึงได้ออกมาเป็น 2048
3. ทำการทดลองหมุนเป็นจำนวน 3 รอบ คือ ตั้งแต่ 0-1080 องศา เพื่อเป็นการทำซ้ำ
4. ทำการบันทึกเก็บค่าแล้วนำมา plot กราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อ

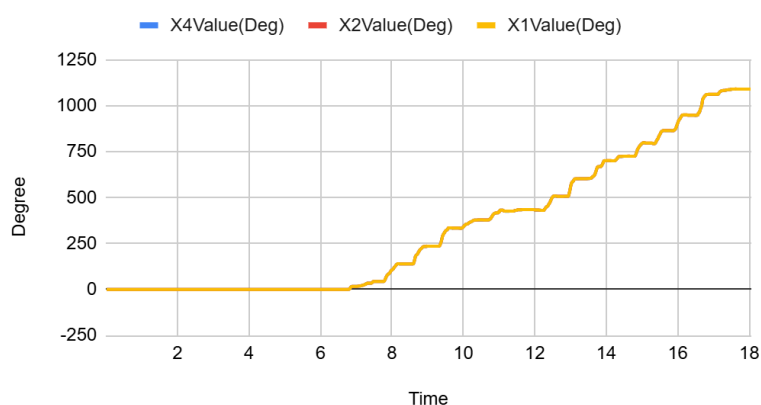
ผลการทดลอง

PEC11RE Compare Counting mode



รูปที่ 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Encoder PEC11RE ในแต่ละ Counting Mode

AMT103-V Compare Counting mode



รูปที่ 20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Encoder AMT103-V ในแต่ละ Counting Mode

สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งแสดงให้เห็นถึงค่าองศาที่ผ่านโปรแกรม Simulink มีความแม่นยำสูง จากการหมุน 3 รอบ แล้วองศาเป็นค่าที่เริ่มจาก 0 ไปถึง 1080 ทำให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ
2. เมื่อทดลองด้วยการรับค่าจาก Counting Method ต่าง ๆ ทำให้เห็นถึงความละเอียดในการอ่านค่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้น โดย X4 จะสามารถอ่านค่าได้ละเอียดสุดตรงลงมาเป็น X2 จะสามารถอ่านได้ละเอียดรองลงมา และ X1 จะอ่านค่าได้ไม่ละเอียดมาก

อภิปรายผล

1. จากการทดลองพบว่า งบศาหลังจากการแปลงสัญญาณผ่านโปรแกรม Simulink เปลี่ยนแปลงไปตามงบศาที่หมุนจริง โดยใช้ค่า Gain ที่นำมาจากค่า Count สำหรับแต่ละ Counting Method เนื่องจากแต่ละประเภทมีค่า Count ใน 1 pulse ไม่เท่ากัน โดย X1 มี 1 Count X2 มี 2 Count และ X4 มี 4 Count
2. จากการทดลองพบว่า ความละเอียดของงบศาที่สามารถวัดได้เมื่อเปรียบเทียบ X4 กับ X1 จะมีความละเอียดมากกว่ากัน 4 เท่า และ X2 กับ X1 จะมีความละเอียดมากกว่ากัน 2 เท่า
3. Phase Relationship ของ pin A และ B จะ shift กัน 90 องศา สัญญาณ pin ที่มาก่อนขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุน

ข้อเสนอแนะ

- ควรหาอุปกรณ์ที่สามารถหมุน Incremental Encoder ด้วย RPM ที่เท่าเดิม

อ้างอิง

<https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/>

<https://www.tic.co.th/th/news/detail/387/2>

การทดลองที่ 2 การเปรียบเทียบทิศทาง CW และ CCW

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษา Phase Relationship ระหว่างสัญญาณ A และ B จาก Incremental Encoder
2. เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของสัญญาณเมื่อทิศทาง CW และ CCW
3. เพื่อศึกษาหลักการและการเขียนโปรแกรม Wrap-around
4. เพื่อศึกษาหลักการและการเขียนโปรแกรม Homing Sequence

สมมติฐาน

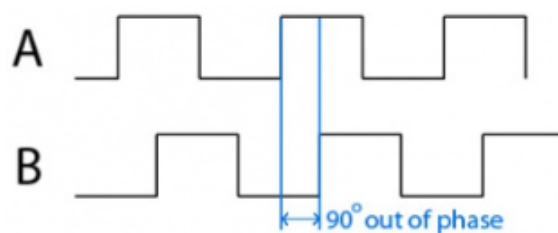
เมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกาจะทำให้ค่าได้ออกมามีค่าหนึ่งและหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะทำให้ค่าเครื่องหมายตรงข้าม

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ทิศทางการหมุน
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่า Phase ของ A และ B
3. ตัวแปรควบคุม:
 - หมุนจำนวน 3 รอบ
 - Fixed Step: 0.01s
 - PEC11RE

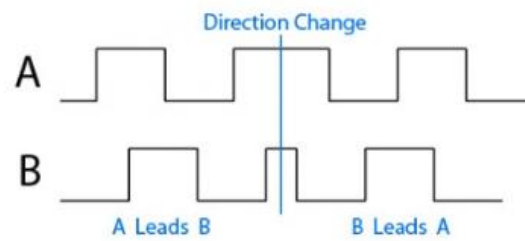
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อ Phase ของสัญญาณทั้ง 2 pin shift กัน 90 องศา จะทำให้สามารถรู้ทิศทางการหมุนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ได้



รูปที่ 21 แสดง Phase shift 90 degree

และถ้าหากต้องการรู้ได้ว่าทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถดูได้จากผู้นำของ Phase

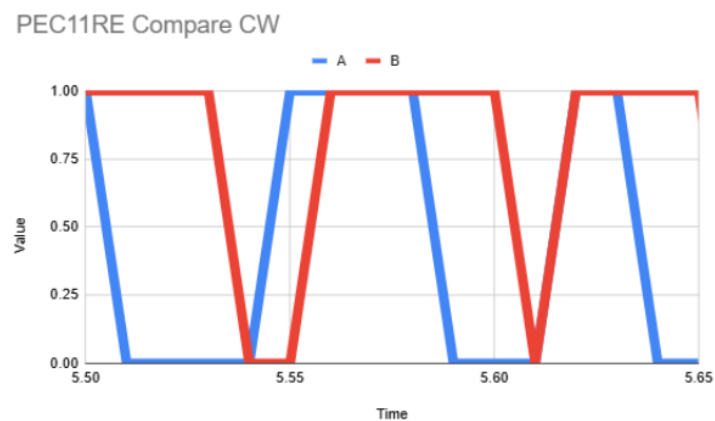


รูปที่ 22 แสดงจังหวะการเปลี่ยนทิศทาง

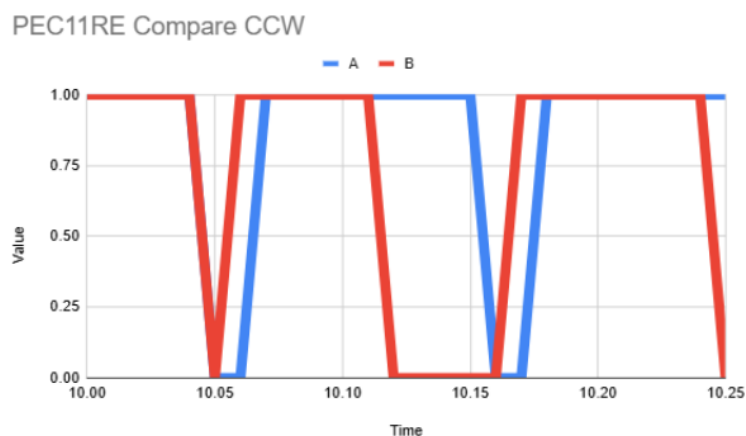
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เลือก Encoder ที่จะทำการทดลองหมุน PEC11R หรือ ATM103-V
2. ทำการทดลองหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) ตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศา
3. ทำการบันทึกค่าจากการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของทิศทางการหมุน

ผลการทดลอง

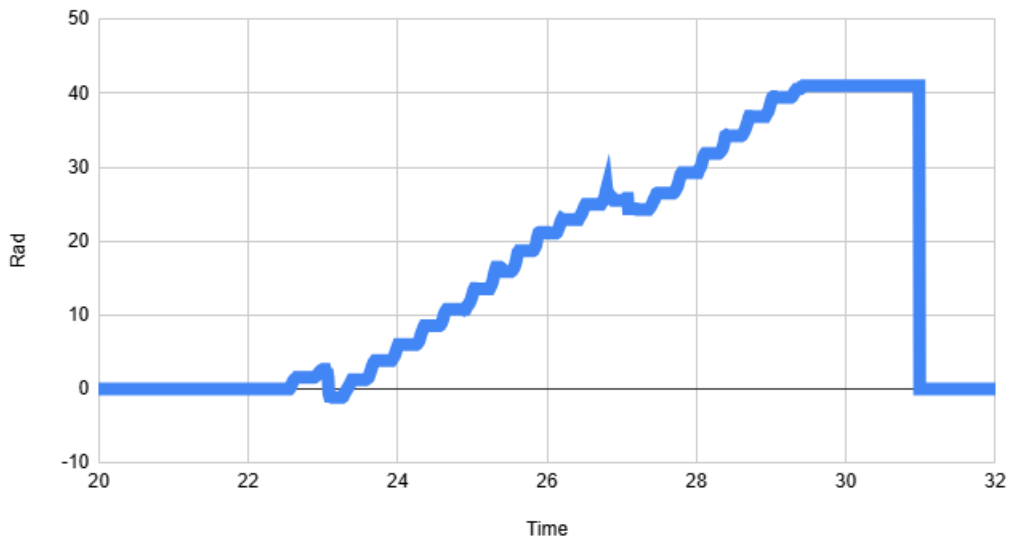


รูปที่ 23 กราฟแสดง Encoder PEC11R Phase A และ B ขณะหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 24 กราฟแสดง Encoder PEC11R Phase A และ B ขณะหมุนตามเข็มนาฬิกา

PEC11RE แสดง Theta ทดลอง Homing



รูปที่ 25 กราฟแสดง Encoder PEC11R แสดงฟังก์ชัน Homing Sequence

สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองสัญญาณ Output ของ Encoder A และ B เปลี่ยนตาม Phase ทิศทางการหมุน
2. ทั้ง 2 Encoder เมื่อ เกิดการหมุนเปลี่ยนทิศทาง จะเกิดการ สลับเปลี่ยน ฟังก์ชัน Homing Sequence สามารถทำงานได้

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าการนำของ Phase A นำ B หรือ Phase B นำ A เป็นสัญญาณที่สามารถบ่งบอก ทิศทางได้จริง

ข้อเสนอแนะ

- ทำการทดลองผ่าน Oscilloscope จะทำให้เห็น Phase ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนกว่า

อ้างอิง

https://www.phidgets.com/docs/Encoder_Guide

การทดลองที่ 3 การวิเคราะห์ผลความเร็วในการหมุนและสัญญาณ

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณที่ได้จาก Incremental Encoder ที่ต่างกัน

สมมติฐาน

สัญญาณจาก PEC11R-4220F-N0024 และ AMT103-V จาก Simulink ให้ค่าความเร็วและคุณภาพในการหมุนที่ต่างกัน

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - Incremental Encoder ได้แก่ PEC11R-4220F-N0024 และ AMT103-V
2. ตัวแปรตาม:
 - องศา (Rad)
 - ความเร็วเชิงมุม
 - มุมที่หมุนไป
3. ตัวแปรควบคุม:
 - จำนวนครั้งการหมุน
 - Fixed step: 0.01s
 - Counting Method: X4

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมการนิยามพื้นฐานในการหาตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมของ Encoder มีดังนี้
สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า Resolution

$$res_{\theta} = \frac{2\pi}{PPR}$$

เมื่อ res_{θ} คือ ขนาดของมุมที่เล็กที่สุด (Rad/Pulse)
 PPR คือ Pulse Per Revolute

สมการที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่ง (θ)

$$\theta = res_{\theta} * n_{pulse}$$

เมื่อ θ คือ องศา (Rad)
 n_{pulse} คือ Count

สมการที่ใช้ในการคำนวณความเร็วเชิงมุม (ω)

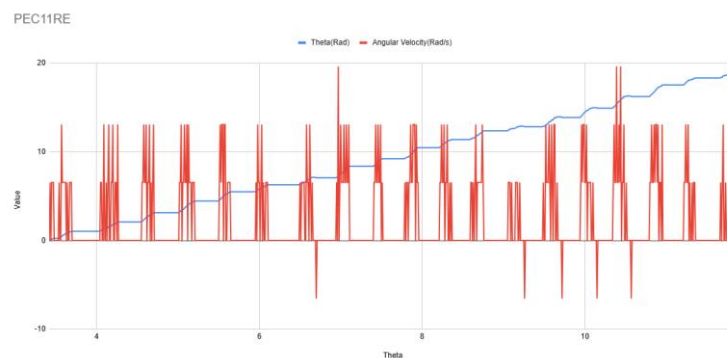
$$\omega = res_{\theta} * \frac{d}{dt} n_{pulse}$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุม (Rad/s)

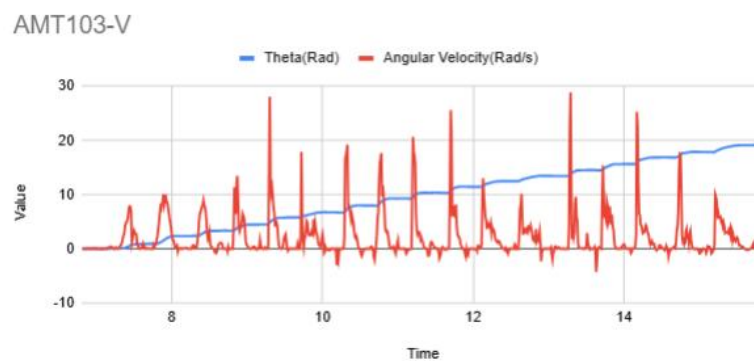
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เปลี่ยน Encoder Mode: เป็น X1 และต่อ block Simulink ทำให้แปลงค่า Count เป็น Position (θ) และ Angular Velocity (ω)
2. ทำการทดลองโดยหมุนตามเข็ม 3 รอบทวนเข็ม 3 รอบ
3. ทำการบันทึกเก็บค่า
4. ทำการ Plot กราฟและวิเคราะห์ข้อมูล

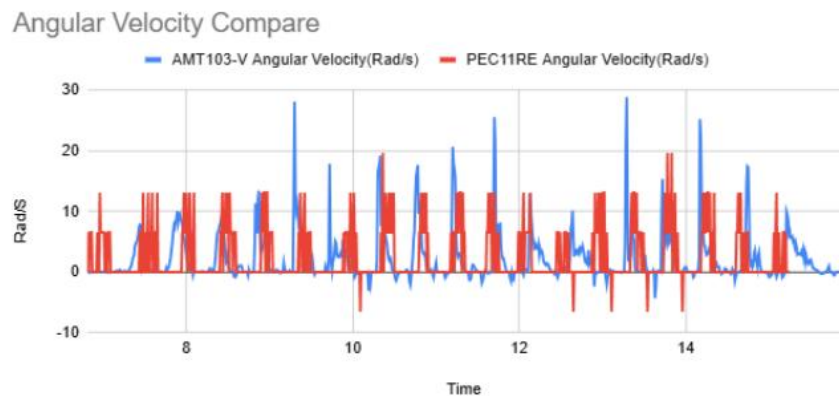
ผลการทดลอง



รูปที่ 26 กราฟแสดงตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมของ PEC11R



รูปที่ 27 กราฟแสดงตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมของ AMT103-V



รูปที่ 28 กราฟเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมจาก AMT103-V และ PEC11R

สรุปผลการทดลอง

1. กราฟความเร็วเชิงมุมของ AMT103-V มีค่าขึ้นลง ตามองศาหมุนไปจะเห็นว่ากราฟความเร็วเชิงมุม มีลักษณะราบเรียบและต่อเนื่อง
2. กราฟความเร็วเชิงมุมของ PEC11RE มีค่าขึ้นลง ตามองศาหมุนไปจะเห็นว่ากราฟความเร็วเชิงมุม มีลักษณะแหลมและขาดความต่อเนื่อง

อภิปราย

1. กราฟความเร็วเชิงมุมของ AMT103-V ที่มีความราบเรียบและต่อเนื่อง เพราะเป็น Capacitive Encoder ทำให้ได้สัญญาณที่มีความละเอียดสูงและต่อเนื่อง ส่งผลให้การคำนวณความเร็วเชิงมุมมีความแม่นยำ
2. กราฟความเร็วเชิงมุมของ PEC11RE ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวนแหลม และขาดความต่อเนื่อง นั้น เกิดจากข้อจำกัดของ Mechanical Encoder ซึ่งอาศัยหน้าสัมผัสทางกลไกที่อาจมีการสั่น หรือการสัมผัสที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ต่อเนื่องและมีสัญญาณรบกวน ส่งผลให้การคำนวณความเร็วเชิงมุมมีความแม่นยำน้อยกว่า AMT103-V

ข้อเสนอแนะ

- หากหมุน Encoder ด้วย Actuator จะทำให้เห็นความแตกต่างของความเร็วเชิงมุมชัดเจนกว่านี้

อ้างอิง

<https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab10/Lab10.pdf>

3. Magnetic Sensor

การทดลองที่ 1 Magnetic Flux Density

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่าง Magnetic Field Shielding และ Magnetic Flux Density
2. เพื่อศึกษาและคำนวณค่า Magnetic Flux Density
3. เพื่อศึกษาการทำงานของ Magnetic Sensor
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Output ของเซนเซอร์ในช่วงที่ทำงาน

สมมติฐาน

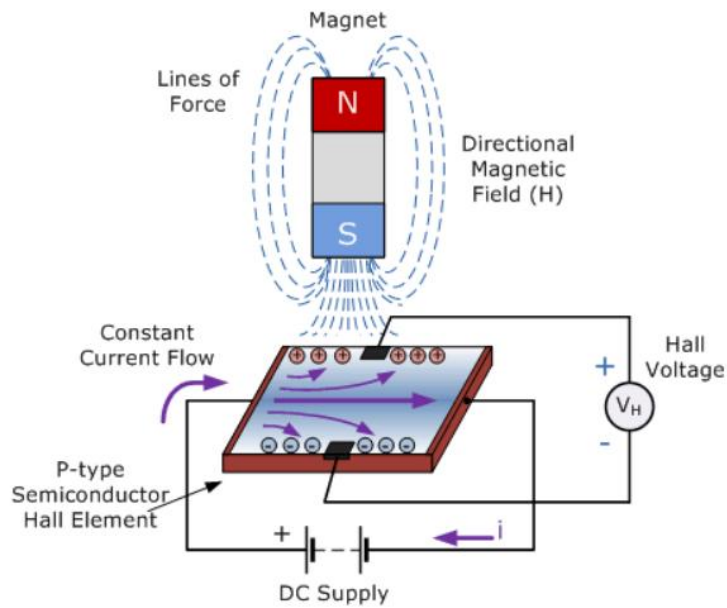
เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กและ Magnetic Sensor เปลี่ยนแปลง จะส่งผลต่อสัญญาณขาออกและ Magnetic Flux Density ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับขั้วของแม่เหล็ก ซึ่งควรมีความสัมพันธ์กันแบบ Sigmoid ตาม Sensitivity Linearity และ Magnetic Shielding จะส่งผลต่อสัญญาณขาออกด้วย

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ระยะห่างของแม่เหล็กตั้งแต่ 1.2 - 4.2 cm. โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.3 cm.
 - การวางขั้วของแม่เหล็ก คือ ขั้วเหนือไปขั้วใต้และขั้วใต้ไปขั้วเหนือ
 - Magnetic Shielding คือ เมื่อมี Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield
2. ตัวแปรตาม:
 - แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out})
 - ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B)
3. ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งมีค่า 3.3 V
 - ค่าความไวของ Sensor ที่อุณหภูมิทั่วไป ($Sensitivity_{25^{\circ}C}$)
 - ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (S_{TC})
 - อุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งกำหนดให้มีค่า $25^{\circ}C$ (T_A)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการ Hall Effect คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นนำไฟฟ้า และมีสนามแม่เหล็กวิ่งมาตัดในแนวตั้งฉาก สนามแม่เหล็กจะ "ผลัก" ประจุไฟฟ้าให้เบนไปกองที่ขอบด้านหนึ่ง การแยกกันของประจุนี้ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้ เรียกว่า Hall Voltage ซึ่งค่าแรงดันนี้จะแปรผันตามความแรงของสนามแม่เหล็กโดยตรง



รูปที่ 29 แสดงหลักการทำงานของ Hall Effect

โดย Magnetic Response ของ DRV5055 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการ ดังนี้

$$V_{\text{out}} = V_Q + B \times (\text{Sensitivity}_{25^\circ\text{C}} \times (1 + S_{\text{TC}} \times (T_A - 25^\circ\text{C})))$$

- เมื่อ V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (mV)
 V_Q คือ ครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (mV)
 B คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (mT)
 $\text{Sensitivity}_{25^\circ\text{C}}$ คือ ค่าความไวของ Sensor ที่อุณหภูมิทั่วไป (25°C)
 S_{TC} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ($\frac{\%}{^\circ\text{C}}$)
 T_A คือ อุณหภูมิแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)

จาก Datasheet ของ DRV5055 แสดงว่าอุปกรณ์มี Magnetic characteristic ดังนี้

6.6 Magnetic Characteristics

for $V_{CC} = 3\text{ V to }3.63\text{ V and }4.5\text{ V to }5.5\text{ V}$, over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

| PARAMETER | | TEST CONDITIONS ⁽¹⁾ | | MIN | TYP | MAX | UNIT | |
|------------------|---|--|--------------|-------------------------|-----------------------|------|-------|---|
| V _Q | Quiescent voltage | B = 0 mT, T _A = 25°C | | V _{CC} = 5 V | 2.43 | 2.5 | 2.57 | V |
| | | | | V _{CC} = 3.3 V | 1.59 | 1.65 | 1.71 | |
| V _{QΔT} | Quiescent voltage temperature drift | B = 0 mT, T _A = −40°C to 125°C versus 25°C | | ±1% × V _{CC} | | | V | |
| V _{QRE} | Quiescent voltage ratiometry error ⁽²⁾ | | | ±0.2% | | | | |
| V _{QΔL} | Quiescent voltage lifetime drift | High-temperature operating stress for 1000 hours | | < 0.5% | | | | |
| S | Sensitivity | V _{CC} = 5 V, T _A = 25°C | DRV5055A1/Z1 | 95 | 100 | 105 | mV/mT | |
| | | | DRV5055A2/Z2 | 47.5 | 50 | 52.5 | | |
| | | | DRV5055A3/Z3 | 23.8 | 25 | 26.2 | | |
| | | | DRV5055A4/Z4 | 11.9 | 12.5 | 13.2 | | |
| | | V _{CC} = 3.3 V, T _A = 25°C | DRV5055A1/Z1 | 57 | 60 | 63 | | |
| | | | DRV5055A2/Z2 | 28.5 | 30 | 31.5 | | |
| | | | DRV5055A3/Z3 | 14.3 | 15 | 15.8 | | |
| | | | DRV5055A4/Z4 | 7.1 | 7.5 | 7.9 | | |
| B _L | Linear magnetic sensing range ^{(3) (4)} | V _{CC} = 5 V, T _A = 25°C | DRV5055A1/Z1 | ±21 | | | mT | |
| | | | DRV5055A2/Z2 | ±42 | | | | |
| | | | DRV5055A3/Z3 | ±85 | | | | |
| | | | DRV5055A4/Z4 | ±169 | | | | |
| | | V _{CC} = 3.3 V, T _A = 25°C | DRV5055A1/Z1 | ±22 | | | | |
| | | | DRV5055A2/Z2 | ±44 | | | | |
| | | | DRV5055A3/Z3 | ±88 | | | | |
| | | | DRV5055A4/Z4 | ±176 | | | | |
| V _L | Linear range of output voltage ⁽⁴⁾ | | | 0.2 | V _{CC} − 0.2 | | V | |
| S _{TC} | Sensitivity temperature compensation for magnets ⁽⁵⁾ | DRV5055A1, DRV5055A2, DRV5055A3, DRV5055A4 | | 0.12 | | | %/°C | |

รูปที่ 30 Magnetic characteristic ของ DRV5055

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะมีช่วงข้อมูลที่สามารถแสดงเป็น Sensitivity Linearity ได้ ดังนี้

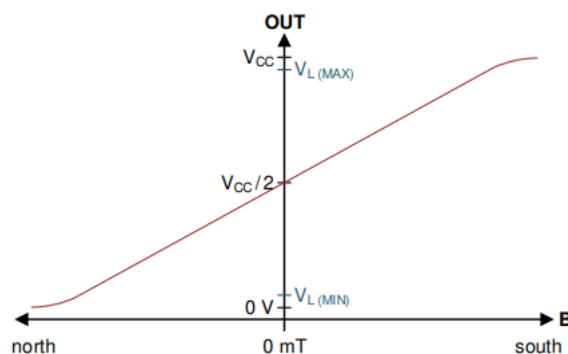


Figure 7-3. Magnetic Response

รูปที่ 31 Sensitivity Linearity

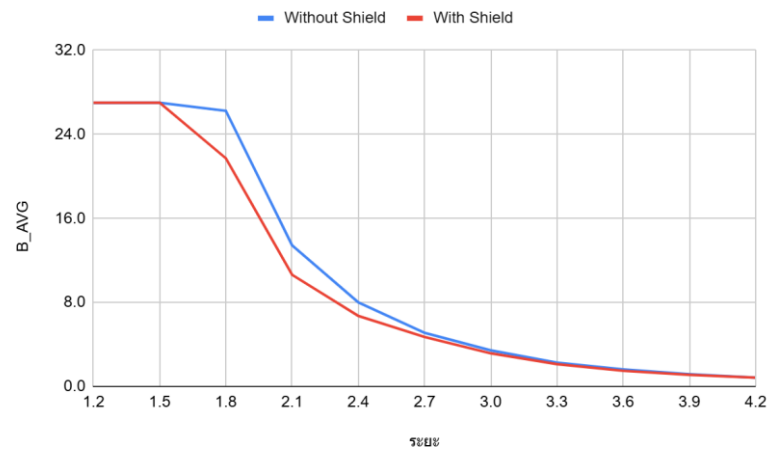
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. กำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการคำนวณ และนำค่าจาก Datasheet มาแทนในสมการ
2. ทดลองเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่อเปลี่ยนระยะห่างของแม่เหล็กจาก Magnetic Sensor ตั้งแต่ระยะ 1.2 - 4.2 cm. โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.3 cm. ทำซ้ำระยะละ 3 ครั้ง
3. โดยทำการทดลองเมื่อวางขั้วแม่เหล็กทิศเหนือไปได้ และขั้วแม่เหล็กทิศใต้ไปเหนือ ทั้งขณะที่มี Magnetic Shield และไม่มี Magnetic Shield

- นำค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมาคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วนำค่านั้นมา plot กราฟเทียบกับ ระยะห่างของแม่เหล็กจาก Magnetic Sensor และ plot กราฟ Sensitivity Linearity โดยบริเวณที่ B เป็น 0 จะไม่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการทดลองที่แสดงค่าชัดเจน

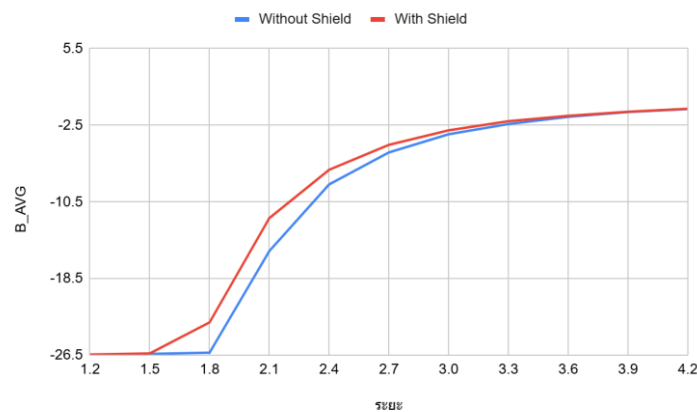
ผลการทดลอง

กราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อมี Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield จากทิศ South to North



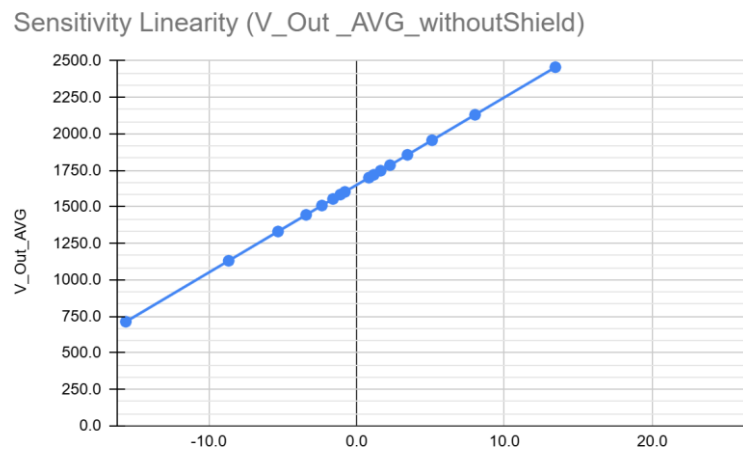
รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อมี Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield จากทิศ South to North

กราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อมี Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield จากทิศ North to South

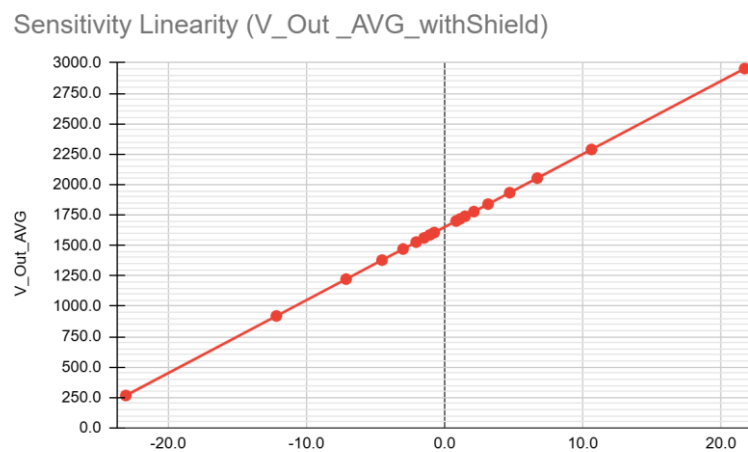


รูปที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อมี Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield จากทิศ North to South

กราฟแสดงความสัมพันธ์ Magnetic Response



รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Magnetic Response และเมื่อไม่มี Magnetic Shield



รูปที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Magnetic Response และเมื่อมี Magnetic Shield

สรุปผลการทดลอง

1. Magnetic Sensor จะให้ค่าสัญญาณแรงดัน Output ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือ ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับแม่เหล็ก
2. จากการทดลอง Magnetic Shield และเมื่อไม่มี Magnetic Shield ผลลัพธ์ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีความแตกต่างกัน
3. จากการทดลองพบว่าแรงดันที่ได้จาก Magnetic Sensor เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์พบว่าแรงดัน Output จากเซนเซอร์แปรสัมพันธ์กับระยะห่างเป็นแนวโน้มเชิงเส้น

อภิปรายผล

1. จากผลการทดลองพบว่า Magnetic Sensor มีพฤติกรรมเชิงเส้นในช่วงแรงดันที่อยู่ในขอบเขต V_L ซึ่งหมายความว่าเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนคงที่
2. เมื่อเพิ่ม Magnetic Shield ทำหน้าที่เปลี่ยนการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กหลัก ผลคือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้ลดลง แต่มีความเสถียรเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบจุดเดียวกันของระยะ
3. จากค่าแรงดัน Output ของเซนเซอร์ อยู่ในช่วงค่า V_L (Linear range of output voltage) ของเซนเซอร์ สัมพันธ์กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถทำงานตอบสนองแบบเชิงเส้น

ข้อเสนอแนะ

- อุณหภูมิของห้องต้องคงที่ 25 องศาเซลเซียส
- องค์การติดตั้งของ shield และแม่เหล็ก
- ความละเอียดของระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://www.ti.com/lit/ds/symmlink/drv5055.pdf?ts=1753064339462>

<https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>

4. Load Cell

การทดลองที่ 1 Load Cell

จุดประสงค์

1. ศึกษาหาค่า Saturation ที่เหมาะสมเพื่อนำไปหาค่า Gain
2. เพื่อศึกษาปรับค่า Gain และทำการ Calibration ของวงจร Amplifier เพื่อให้ค่า Output มีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำก่อนเข้าสู่ช่วง Saturated
3. เพื่อศึกษาการทำงานของ Load Cell และการเปลี่ยนแรงในเชิงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า

สมมติฐาน

เมื่อปรับค่าความต้านทานจะส่งผลให้ค่า Gain ของ Load Cell เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสัญญาณที่ออกมา หากต้องการให้สัญญาณที่ออกมาระบุน้ำหนักที่ถูกต้องของถุทรายได้ จำเป็นต้องปรับตัวต้านทานให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ถุทรายน้ำหนักตั้งแต่ 0 - 10 Kg. โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 Kg.
 - ค่าความต้านทาน (R_G)
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าสัญญาณที่ออกมาจากการทดลองที่น้ำหนักตั้งแต่ 0 - 10 Kg. โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 Kg
 - ค่า Gain (G) ของ Load Cell
3. ตัวแปรควบคุม:
 - ถุทรายขนาด 500 g. จำนวน 20 ถุ
 - บอร์ด Load Cell

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานของ Load Cell เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยการแปลงพลังงานทางกลให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยใช้ส่วนประกอบหลักที่ทำงานร่วมกันอย่างมีลำดับ ได้แก่ Strain Gauge, Wheatstone Bridge, Differential Amplifier และ วงจรแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล

Strain Gauge คืออุปกรณ์ที่มีหน้าที่ตรวจจับ “การยืด” หรือ “การหดตัว” ของวัสดุ เมื่อวัสดุที่ติดตั้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกล (เช่น ถูกกดหรือดึง) ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำภายในจะเปลี่ยน ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R)

เมื่อค่า R ของ Strain Gauge เปลี่ยนเพียงเล็กน้อย การวัดโดยตรงจะยากมาก จึงต้องใช้วงจร **Wheatstone Bridge** เพื่อเปลี่ยนแปลงของความต้านทานให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตรวจวัดได้ง่ายกว่า โดยวงจร Wheatstone Bridge จะประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวต่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยใช้จุดตรงข้ามกันต่อกับแหล่งจ่ายไฟ และอีกสองจุดเป็นจุดวัดแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงกระทำกับโครงสร้างของ Load Cell เกิดการโค้งงอ Strain Gauge บางตัวจะยืด (ค่า R เพิ่มขึ้น) ในขณะที่อีกบางตัวถูกอัด (ค่า R ลด) ความไม่สมดุลของบริดจ์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า Output มีขนาดอยู่ในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) และมีขั้วบวกหรือลบตามทิศทางของแรงที่มากระทำ

เมื่อแรงดันจาก Wheatstone Bridge ออกมามีค่าน้อยมากๆ จึงต้องมีการขยายด้วยวงจร **2 Op-amps Differential Amplifier** เพื่อเป็นการขยายแรงดันต่างศักย์ ($V_{IN}^+ - V_{IN}^-$) และกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม

วงจร Op-Amp เป็นวงจรที่ถูกนำไปใช้ประยุกต์ในการขยายสัญญาณแบบต่าง ๆ ซึ่งมีการทำงานดังสมการนี้

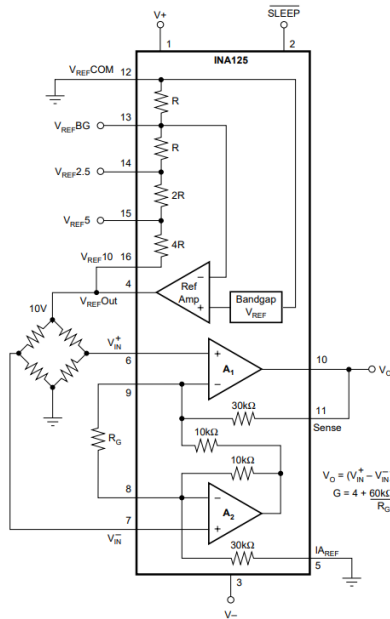
$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-)G$$

| | | |
|-------|------------|------------------------------|
| เมื่อ | V_O | คือ แรงดันขาออก (V) |
| | V_{IN}^+ | คือ แรงดันขาเข้า ฝั่งบวก (V) |
| | V_{IN}^- | คือ แรงดันขาเข้า ฝั่งลบ (V) |
| | G | คือ อัตราขยาย |

INA125 เป็น IC ที่ใช้ในการขยายสัญญาณสำหรับการวัดคูลัม ซึ่งใช้ไฟต่ำแต่มีความแม่นยำสูง และสามารถตั้งอัตราขยายได้ตั้งแต่ 4 – 10,000 เท่า ซึ่งสามารถหาอัตราขยายได้ตามสมการ ดังนี้

$$G = 4 + \frac{60 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

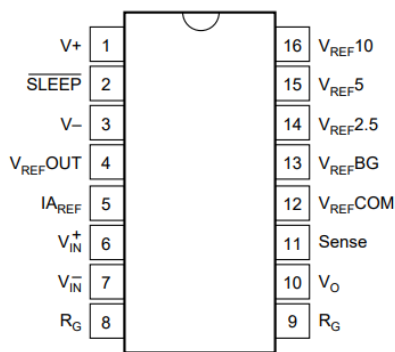
| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | G | คือ อัตราขยาย |
| | R_G | คือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างขา 8 และ 9 ของ IC (Ω) |



รูปที่ 36 วงจรภายใน INA125

Top View

16-Pin DIP, SO-16



รูปที่ 37 ขา Pin ของ INA125

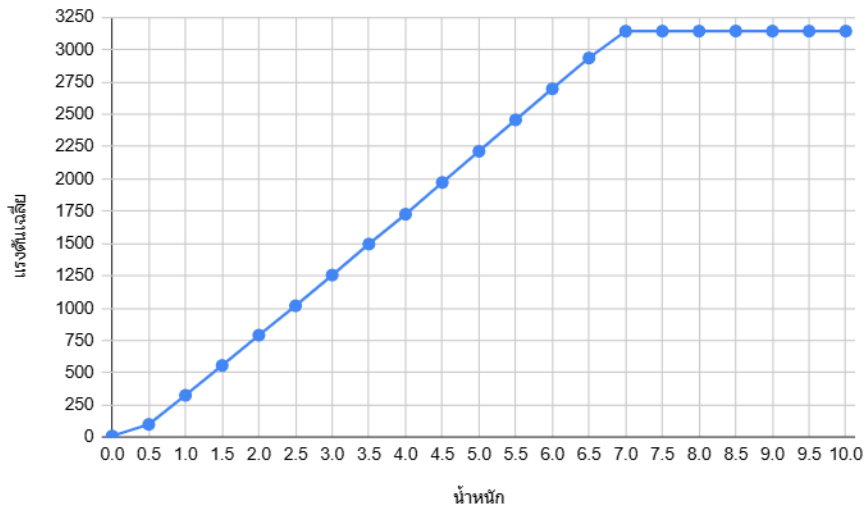
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อบอร์ด Load Cell เข้ากับ MATLAB เพื่อให้สามารถอ่านค่าสัญญาณที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้นได้
2. วางถุงทรายด้วยน้ำหนัก 10 Kg. แล้วทำการปรับค่าความต้านทานที่ทำให้ค่าสัญญาณอยู่ในระดับที่เหมาะสม
3. วัดค่าสัญญาณของ V_O , V_{IN}^+ และ V_{IN}^- จากขาของ IC ตาม Datasheet จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า Gain และนำไปหาค่า R_G ต่อ
4. ทำการเก็บผลการทดลองโดยเก็บค่าสัญญาณจากน้ำหนักถุงทรายทั้งหมด 20 ถุง แล้วลดลงครึ่งละ 1 ถุง และเก็บค่าน้ำหนักของถุงทรายที่ลดไป
5. นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot graph และวิเคราะห์กราฟเพื่อเขียนโปรแกรมที่ทำให้สามารถอ่านค่าน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง
6. หลังจากได้ graph จะพบว่ามีช่วงที่ค่าคงที่หรือช่วง Saturation ซึ่งค่าสัญญาณจะอยู่ที่ประมาณ 3100 จึงทำขั้นตอนที่ 2 ซ้ำอีกครั้ง โดยปรับค่าความต้านทานให้สัญญาณอยู่ในช่วง 3100

7. ทำการทดลองขั้นตอนที่ 3 – 5 ซ้ำเพื่อเก็บค่าสัญญาณที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าทั้งหมดมาเฉลี่ยก่อนนำไป plot graph

ผลการทดลอง

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของแรงดันเฉลี่ยกับแรงกระทำก่อนการเกิด Saturation

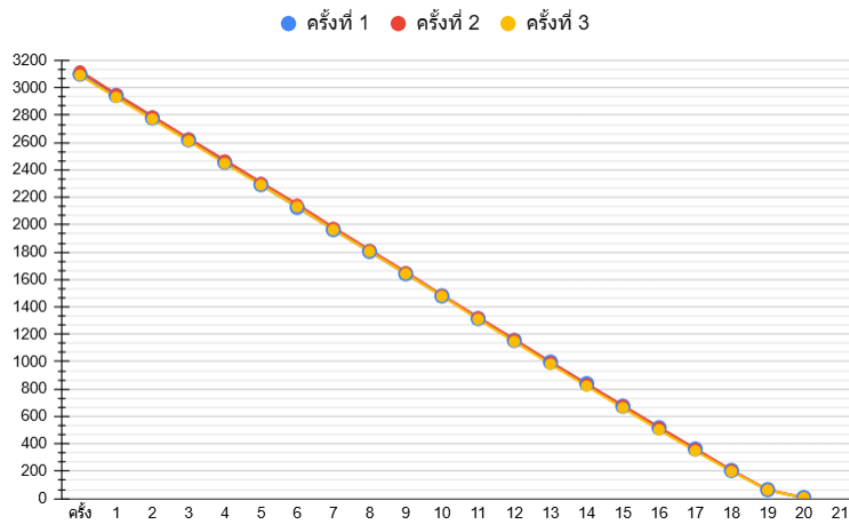


รูปที่ 38 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของแรงดันเฉลี่ยกับแรงกระทำก่อนการเกิด Saturation

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่า Gain และค่า R_G จากสัญญาณ V_o , V_{IN}^+ และ V_{IN}^- ที่วัดได้

| แรงดันขาออก | แรงดันขาเข้า ผังบวก | แรงดันขาเข้า ผังลบ | อัตราขยาย | ค่าความต้านทาน |
|-------------|---------------------|--------------------|-----------|----------------|
| 2.57 | 1.244 | 1.24 | 642.5 | 93.970 |

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงกับสัญญาณ Output



รูปที่ 39 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงกับสัญญาณ Output

สรุปผลการทดลอง

1. ค่าแรงดันเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักอย่างสม่ำเสมอและเป็นสัดส่วน แสดงถึงการทำงานของเซนเซอร์ในช่วงเชิงเส้น แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักเกิน ค่าแรงดันจะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นอีก แม้จะเพิ่มน้ำหนักต่อไป ซึ่งหมายถึงว่าเซนเซอร์เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Saturation) แล้ว
2. จากผลการทดลอง พบว่าค่าแรงดัน Output แปรผันตรงเป็นเส้นตรงกับน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของ Load Cell มีการเปลี่ยนแปลง แรงทางกล เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า
3. จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณแรงดันที่ออกมาผ่านโปรแกรม Simulink มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ทำให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะแก่การนำไป Calibration

อภิปรายผล

1. จากผลการทดลองวัดค่าแรงดันที่ได้จากโปรแกรม ในช่วง 0-6.5 กิโลกรัม แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อน้ำหนักที่ 7 กิโลกรัมขึ้นไปแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่า วงจรวัดสัญญาณหรือโวลต์เซลล์เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว
2. วงจรขยายสัญญาณมีค่า Gain ที่สูงเกินไปทำให้แรงดันเกินขีดจำกัดของวงจรขยายทำให้เมื่อเพิ่มน้ำหนักแต่แรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. จากการทดลองวัดค่าแรงดันผ่านโปรแกรมพบว่า Output มีการทำงานของ Load Cell มีการเปลี่ยนแรงในทางกลเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผ่านทางโปรแกรม
4. จากการทดลอง 3 ครั้งพบว่าแรงดันที่ได้จากทางโปรแกรม Simulink มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถไปใช้ในการกำหนดค่าเพื่อใช้ในการ Calibrate

ข้อเสนอแนะ

- ฐานของ Load Cell ควรมีพื้นที่กว้างขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักได้สะดวกขึ้น
- ถ่วงน้ำหนักควรมีน้ำหนักที่ใกล้เคียง 500 g. มากที่สุด

อ้างอิง

<https://shorturl.at/nAU62>

การทดลองที่ 2 คำนวณน้ำหนักที่ได้จาก Load Cell

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาคำนวณน้ำหนักจาก Load Cell และเปรียบเทียบค่าน้ำหนักจากเครื่องชั่ง Digital
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า Output ของ Load Cell เปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปแบบ Real Time
3. เพื่ออธิบายและวิเคราะห์ สาเหตุความคลาดเคลื่อน ที่ทำให้ค่าน้ำหนักจาก Load Cell แตกต่างจากค่ามาตรฐานของเครื่องชั่ง Digital

สมมติฐาน

ค่าน้ำหนักที่ได้จาก Simulink ของถุงทรายแต่ละรอบ ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักของถุงทรายจริง หรือมีค่าน้ำหนักเท่ากับค่าน้ำหนักจริง ± 100 g.

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - จำนวนถุงทราย 20 ถุง ที่ลดลงทีละ 1 ถุง จนกระทั่งไม่มีถุงทราย
 - น้ำหนักจากถุงทราย 20 ถุง ที่ลดลงทีละ 1 ถุง จนกระทั่งไม่มีถุงทราย
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าน้ำหนักที่ได้จาก Simulink ตั้งแต่ถุงทราย 20 ถุงจนกระทั่งไม่มีถุงทราย
 - ค่าน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่ง Digital ตั้งแต่ถุงทราย 20 ถุงจนกระทั่งไม่มีถุงทราย
3. ตัวแปรควบคุม:
 - ถุงทรายขนาด 500 g. จำนวน 20 ถุง
 - อัตราขยายของ Load Cell

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Datasheet Amplifier INA125

SPECIFICATIONS: $V_S = +5V$

At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = +5V$, I_A common at $V_{D/2}$, V_{REF} common = $V_{D/2}$, $V_{CM} = V_{D/2}$, and $R_L = 10k\Omega$ to $V_{D/2}$, unless otherwise noted.

| PARAMETER | CONDITIONS | INA125P, U | | | INA125PA, UA | | | UNITS |
|---|---|------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-----|-----------------|--|
| | | MIN | TYP | MAX | MIN | TYP | MAX | |
| INPUT Offset Voltage, RTI Initial vs Temperature vs Power Supply Input Voltage Range Common-Mode Rejection | $V_S = +2.7V$ to $+36V$ $V_{CM} = +1.1V$ to $+3.6V$ $G = 4$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 500$ | | ± 75 ± 0.25 3 | ± 500 20 | | * | ± 750 50 | μV $\mu V/^\circ C$ $\mu V/V$ |
| | | | See Text | | | * | | |
| | | 78 | 84 | 72 | * | * | * | dB |
| | | 86 | 94 | 80 | * | * | * | dB |
| GAIN Gain Error | $V_D = +0.3V$ to $+3.8V$ $G = 4$ | | | | | * | | % |
| | | | ± 0.01 | | | * | | |
| | | | | | | * | | |
| | | | | | | * | | |
| OUTPUT Voltage, Positive Negative | | | $(V^+)-1.2$ $(V^-)+0.3$ | $(V^+)-0.8$ $(V^-)+0.15$ | * | * | * | V V |
| | | | | | * | * | * | |
| POWER SUPPLY Specified Operating Voltage Operating Voltage Range Quiescent Current Sleep Current ($V_{DLEEP} \leq 100mV$) | $I_D = I_{REF} = 0mA$ $R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$ | | +2.7 | +36 | * | * | * | V V μA μA |
| | | | | 460 | * | * | * | |
| | | | | ± 1 | ± 25 | * | * | |
| | | | | | | * | * | |

* Specification same as INA125P, U.

รูปที่ 40 Datasheet ของ Amplifier INA125

Datasheet Load Cell YZC-131A

| YZC-131A Series Product Specifications | |
|--|-----------------|
| Mechanical | |
| Housing Material | Aluminum Alloy |
| Load Cell Type | Strain Gauge |
| Capacity | 1/2/3/5 kg |
| Dimensions | Lx12.7x12.7 mm |
| Mounting Holes | M5 (Screw Size) |
| Cable Length | 210 mm |
| Cable Size | 30 AWG (0.2mm) |
| Cable - no. of leads | 4 |
| Electrical | |
| Precision | 0.05% |
| Rated Output | 1.0±0.15 mV/V |
| Non-Linearity | 0.05% FS |
| Hysteresis | 0.03% FS |
| Non-Repeatability | 0.03% FS |
| Creep (per 5 minutes) | 0.1% FS |
| Temperature Effect on Zero (per 10°C) | 0.02% FS |
| Temperature Effect on Span (per 10°C) | 0.05% FS Zero |
| Balance | ±1.5% FS |
| Input Impedance | 1000±50 Ohm |
| Output Impedance | 1000±50 Ohm |
| Insulation Resistance (Under 50VDC) | ≥2000 MOhm |
| Excitation Voltage | 5 VDC |
| Compensated Temperature Range | -10 to ~+40°C |
| Operating Temperature Range | -21 to ~+40°C |
| Safe Overload | 120% Capacity |
| Ultimate Overload | 150% Capacity |

รูปที่ 41 Datasheet ของ Load Cell YZC-131A

ดังนั้นจะเห็นว่าจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าแรงดันของ IC ที่แปรผันตรงกับน้ำหนักที่วัดได้จาก Load cell และเมื่อค่าที่นำเข้านั้นผ่าน IC และ Load cell ที่มีค่า Error จากอุปกรณ์ทั้งคู่มาด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าที่ Simulink อ่านด้วยเช่นกัน

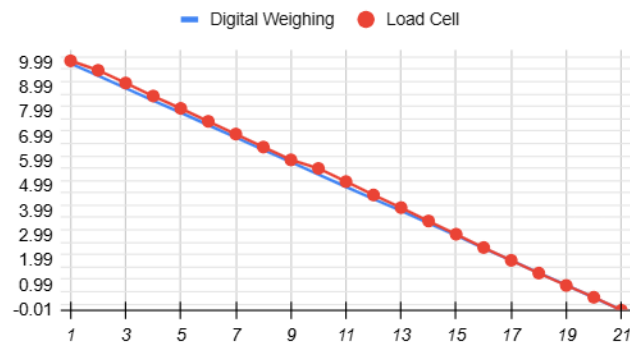
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อบอร์ด Load Cell เข้ากับ MATLAB เพื่อให้สามารถอ่านค่าน้ำหนักที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้นได้
2. ทดลองวางถุงทรายทั้งหมด 20 ถุง บน Load Cell
3. ทำการเก็บผลการทดลองโดยเก็บค่าสัญญาณจากน้ำหนักถุงทรายทั้งหมด 20 ถุง แล้วลดลงครึ่งละ 1 ถุง พร้อมกับเก็บค่าน้ำหนักของถุงทรายที่ลดไปด้วย
4. นำค่าที่ได้จากการทดลองมา plot graph และเปรียบเทียบค่าจาก graph ที่ได้กับ graph ของน้ำหนักจริง
5. นำ graph ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนกับ graph น้ำหนักจากเครื่องชั่ง และนำช่วงความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ มาแบ่งเป็นเงื่อนไขในการคูณค่าคงที่เข้าไป เพื่อให้สามารถอ่านค่าได้อย่างแม่นยำ
6. ทำการทดลองขั้นตอนที่ 3 – 5 ซ้ำเพื่อเก็บค่าสัญญาณที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าทั้งหมดมาเฉลี่ยก่อนนำไป plot graph เพื่อเก็บผลลัพธ์ของเครื่องชั่งจาก Load Cell

ผลการทดลอง

การทดลองเปรียบเทียบค่าจากโปรแกรม Simulink และ เครื่องชั่งน้ำหนัก Digital ครั้งที่ 1

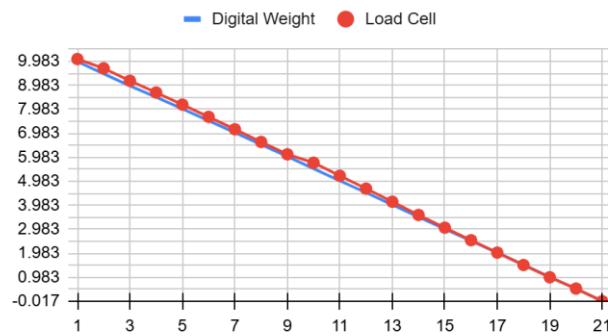
Experiment 1



รูปที่ 42 ผลการทดลองน้ำหนักจาก Simulink เปรียบเทียบกับเครื่องชั่ง Digital ครั้งที่ 1

การทดลองเปรียบเทียบค่าจากโปรแกรม Simulink และ เครื่องชั่งน้ำหนัก Digital ครั้งที่ 2

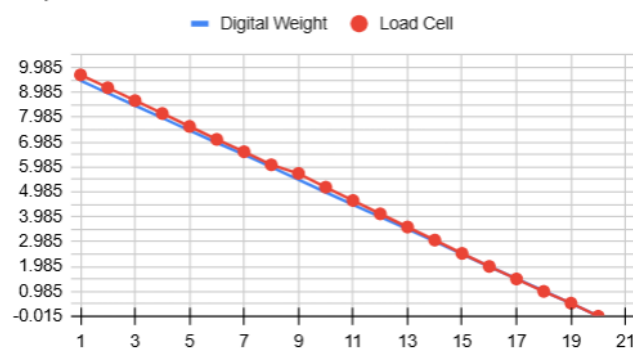
Experiment 2



รูปที่ 43 ผลการทดลองน้ำหนักจาก Simulink เปรียบเทียบกับเครื่องชั่ง Digital ครั้งที่ 2

การทดลองเปรียบเทียบค่าจากโปรแกรม Simulink และ เครื่องชั่งน้ำหนัก Digital ครั้งที่ 3

Experiment 3



รูปที่ 44 ผลการทดลองน้ำหนักจาก Simulink เปรียบเทียบกับเครื่องชั่ง Digital ครั้งที่ 3

สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองวัดค่าน้ำหนักโดยใช้ Load Cell และเครื่องชั่ง Digital พบว่าค่าน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณของ Load Cell มีการเปลี่ยนแปลงไปแบบ Real Time แสดงให้เห็นความสอดคล้องกับค่าน้ำหนักจริง
2. เมื่อเปรียบเทียบค่าจากการทดลองเปลี่ยนน้ำหนักของ Load Cell เทียบกับเครื่องชั่ง Digital พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 0-0.1 Kg.

อภิปรายผล

1. จากผลการทดลองพบว่า ค่าน้ำหนักที่วัดได้จาก Load Cell มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับเครื่องชั่ง Digital ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้
2. ค่าน้ำหนักจาก Load Cell แสดงการเปลี่ยนแปลงแบบ Real Time แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป
3. ค่าน้ำหนักที่วัดไว้มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยระหว่าง Load Cell และเครื่องชั่ง Digital แสดงให้เห็นถึงคลื่นสัญญาณที่รบกวน

ข้อเสนอแนะ

- การควบคุมอุณหภูมิห้องเพื่อให้มีความเสถียรของค่ามากที่สุด
- การปรับ Calibration ของ Load Cell กับเครื่องชั่ง Digital ก่อนการทดลองทุกครั้ง เพื่อให้ค่าอ้างอิงแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อน
- การมีตัวกรองสัญญาณ หรือการมีตัวช่วยคำนวณในเชิงสถิติเพิ่มเพื่อลดสัญญาณรบกวน

อ้างอิง

<https://shorturl.at/nAU62>

<https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/YZC->

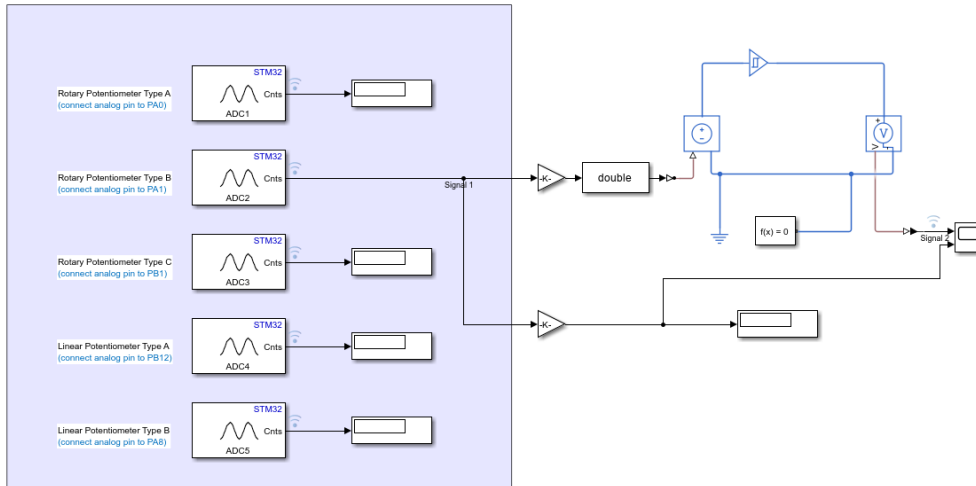
[131A.pdf?srltid=AfmBOopELUPSbOh3zxucX1OC--565xl0TgE00sY6eSyd5UH38FdGfSml](https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/YZC-131A.pdf?srltid=AfmBOopELUPSbOh3zxucX1OC--565xl0TgE00sY6eSyd5UH38FdGfSml)

ภาคผนวก ก

Potentiometer

Simulink Lab Potentiometer

Lab 1.1: Potentiometer



รูปภาพที่ 45 แสดงวงจรใน Simulink Lab Potentiometer

เป็นวงจรแปลงจากค่าแรงดันในรูป 12 Bits มาเป็น แรงดันหน่วย V และ แสดงสัญญาณที่ผ่านวงจร Schmitt Trigger

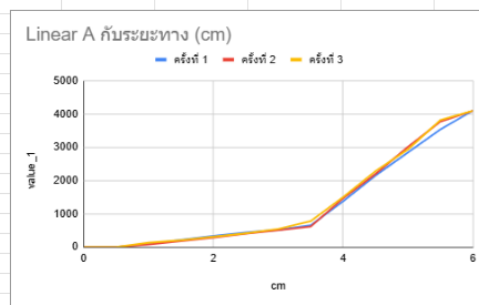
ตารางผลการทดลอง Rotary Potentiometer



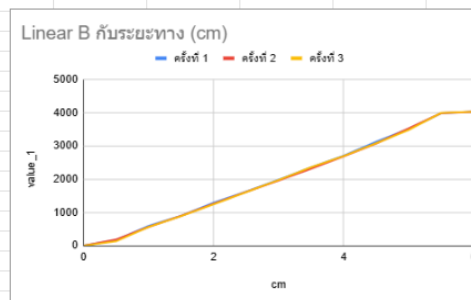
รูปภาพที่ 46 แสดงวงจรใน Simulink Lab Potentiometer

ตารางผลการทดลอง Linear Potentiometer

| Linear a | log | | | |
|----------|-----|---------|---------|---------|
| | cm | value_1 | value_2 | value_3 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 90 | 78 | 128 |
| | 1.5 | 216 | 179 | 203 |
| | 2 | 328 | 281 | 308 |
| | 2.5 | 434 | 400 | 412 |
| | 3 | 515 | 505 | 540 |
| | 3.5 | 650 | 612 | 775 |
| | 4 | 1372 | 1463 | 1500 |
| | 4.5 | 2150 | 2199 | 2280 |
| | 5 | 2840 | 3007 | 2935 |
| | 5.5 | 3534 | 3769 | 3813 |
| | 6 | 4095 | 4095 | 4095 |



| Linear b | linear | | | |
|----------|--------|---------|---------|---------|
| | cm | value_1 | value_2 | value_3 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0.5 | 165 | 185 | 135 |
| | 1 | 589 | 565 | 560 |
| | 1.5 | 897 | 895 | 886 |
| | 2 | 1293 | 1263 | 1245 |
| | 2.5 | 1620 | 1613 | 1610 |
| | 3 | 1976 | 1956 | 1975 |
| | 3.5 | 2353 | 2310 | 2357 |
| | 4 | 2699 | 2684 | 2693 |
| | 4.5 | 3120 | 3072 | 3074 |
| | 5 | 3508 | 3520 | 3478 |
| | 5.5 | 3982 | 3982 | 3989 |
| | 6 | 4024 | 4021 | 4025 |

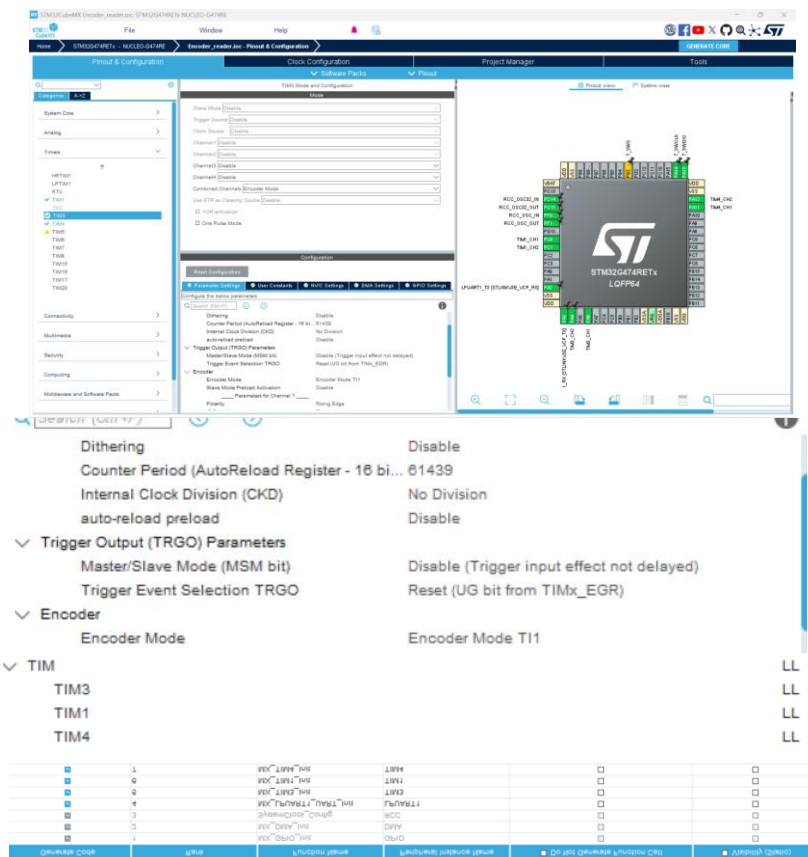


รูปภาพที่ 47 แสดงวงจรใน Simulink Lab Potentiometer

จากตารางผลการทดลอง Linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer เพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของระยะทางและระยะของช่วงองศา ที่สัมพันธ์ในแรงดัน Output และแบ่งชนิดของแต่ละ Potentiometer ตามลักษณะของกราฟ เทียบกับข้อมูล Datasheet

Incremental Encoder

Incremental Encoder Setting:



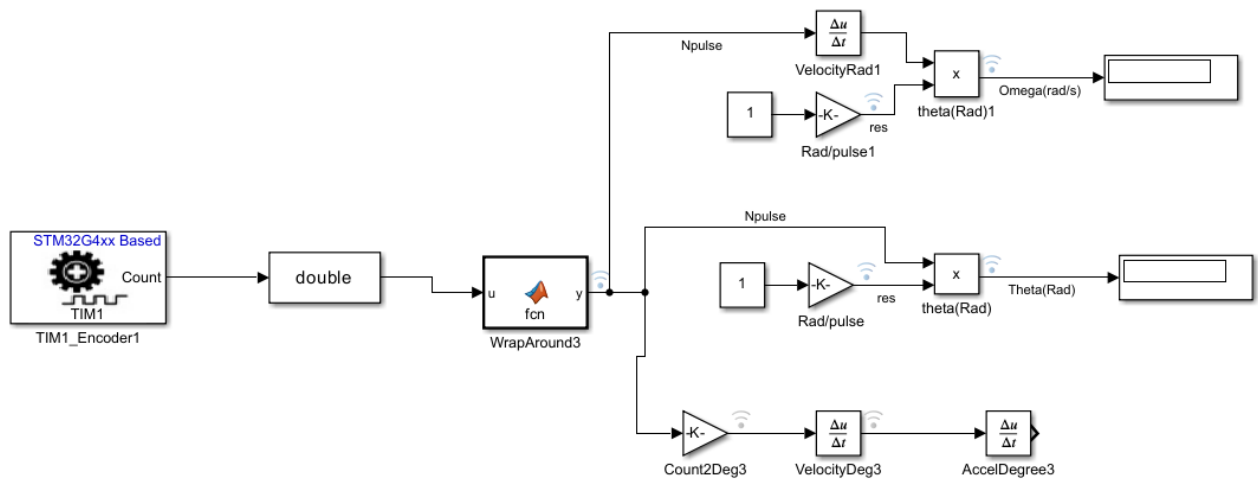
รูปภาพที่ 48 แสดงการตั้งค่า IOC ของ Encoder_reader

โดยตั้ง

TIM1: Encoder mode: X1_TL1 ARR: 61439

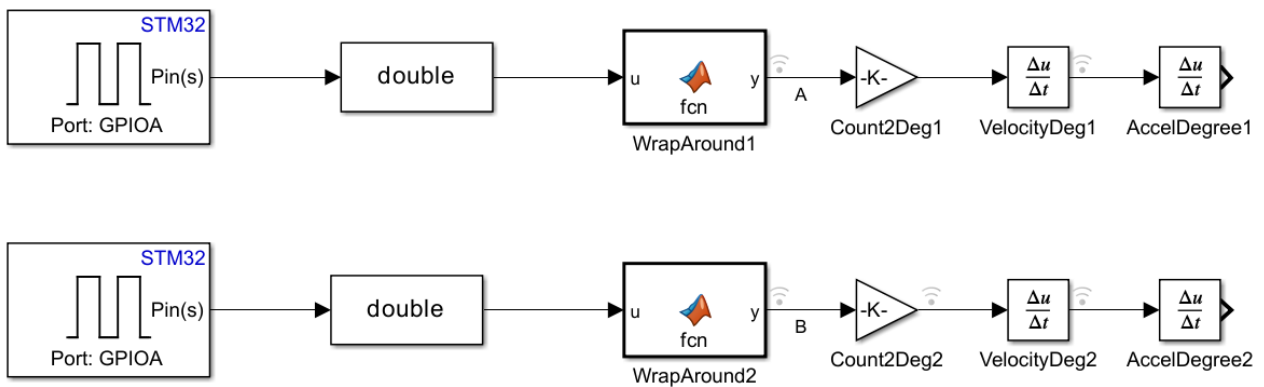
TIM3: Encoder mode: TL1 ARR: 61439

TIM4: Encoder mode: TL1 and TL2 ARR: 61439



รูปภาพที่ 49 แสดงวงจรใน Simulink Lab Incremental Encoder

เป็นวงจรแปลงจากค่า Count มาเป็นองศา, ตำแหน่ง(Rad) และ ความเร็วเชิงมุม(Rad/s)



รูปภาพที่ 50 แสดงวงจรใน Simulink Lab Incremental Encoder สัญญาณ Phase A,B

เป็นวงจรอ่านค่า Phase A และ B จาก Incremental Encoder


```

1 function y = fcn(u, reset)
2
3 persistent PERIOD;
4 persistent HALF_PERIOD;
5 persistent last_raw_count;
6 persistent accumulated_count;
7
8 if isempty(PERIOD)
9     PERIOD = 61440.0;
10    HALF_PERIOD = PERIOD / 2.0;
11 end
12
13 if isempty(last_raw_count)
14     last_raw_count = u;
15     accumulated_count = 0.0;
16 else
17     if reset == 1.0
18         accumulated_count = 0.0;
19         last_raw_count = u;
20     else
21         delta = u - last_raw_count;
22
23         if delta < -HALF_PERIOD
24             delta = delta + PERIOD;
25
26         elseif delta > HALF_PERIOD
27             delta = delta - PERIOD;
28
29         end
30
31         accumulated_count = accumulated_count + delta;
32         last_raw_count = u;
33     end
34 end
35
36 y = accumulated_count;
37 end

```

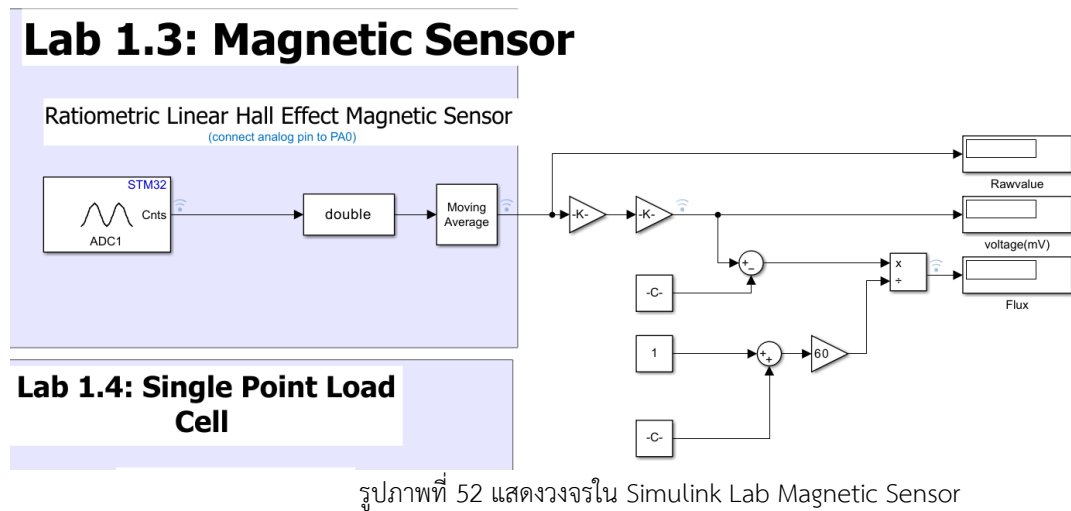
รูปภาพที่ 51 แสดงโปรแกรมการทำงาน Wrap around + homing sequence

เป็นโปรแกรมเพื่อที่ให้อ่านค่าองศาติดลปได้และสามารถ Reset ค่าให้เป็น 0 ได้

ภาคผนวก ค

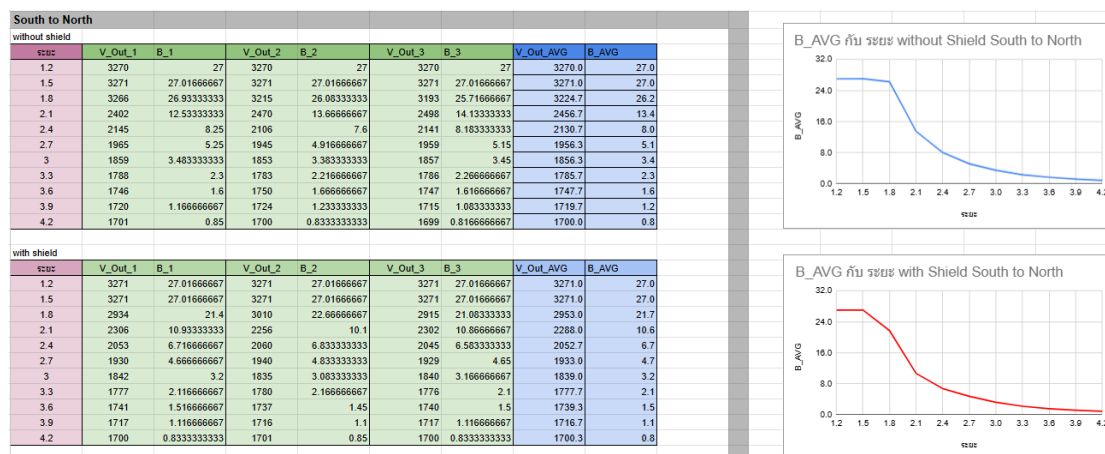
Magnetic Sensor

วงจรใน Simulink Magnetic Sensor Lab:



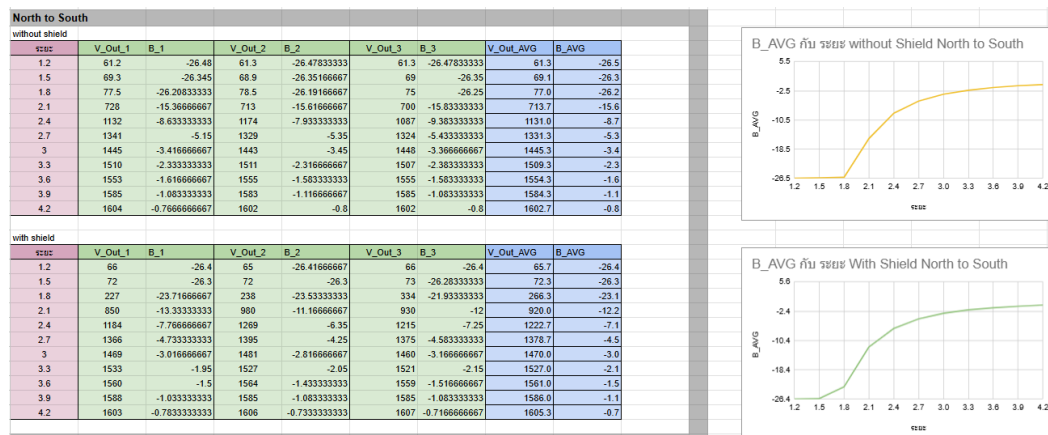
แปลงแรงดันจากรูป 12 Bits กลายเป็นแรงดัน(V) และแปลงเป็น Flux Density แบบ Realtime

ตารางการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อมี Magnetic Shielding และระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในทิศได้ไปสู่เหนือ:



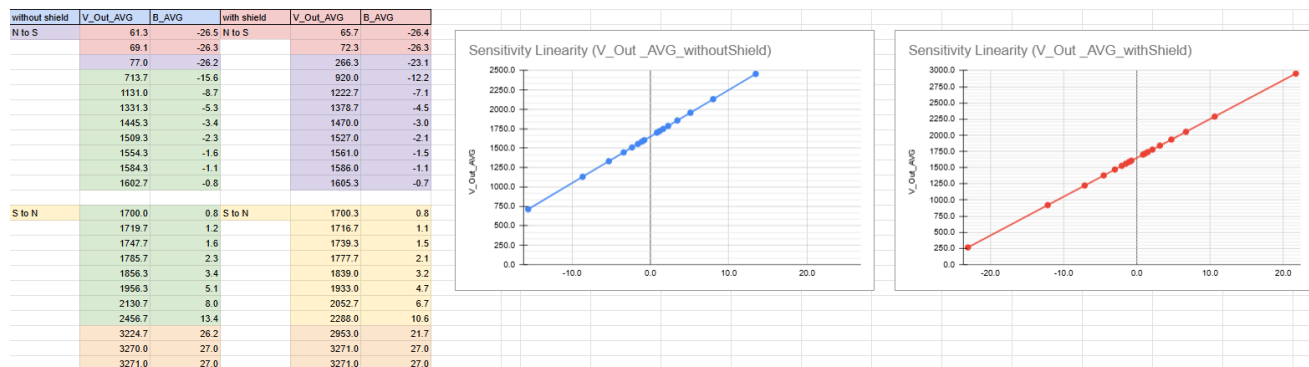
รูปภาพที่ 53 แสดงวงจรใน Simulink Lab Magnetic Sensor

ตารางการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อมี Magnetic Shielding และระยะห่างระหว่างแม่เหล็กในทิศเหนือไปใต้:



รูปภาพที่ 54 แสดงวงจรใน Simulink Lab Magnetic Sensor

ตารางการทดลองเปรียบเทียบค่า Sensitivity Linearity ระหว่างมี Magnetic Shielding และไม่มี Magnetic Shielding:

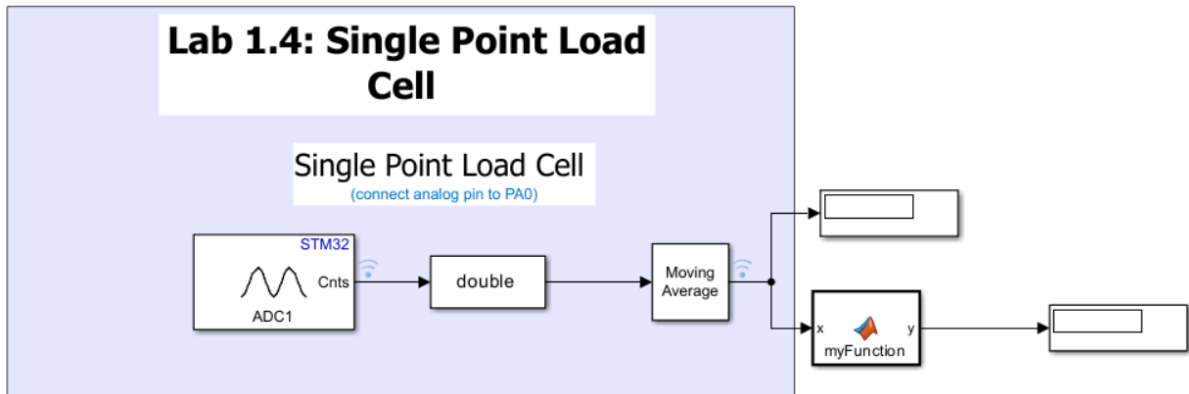


รูปภาพที่ 55 แสดงวงจรใน Simulink Lab Magnetic Sensor

ภาคผนวก ง

Load Cell

วงจรใน Simulink Load Cell Lab:



รูปภาพที่ 56 แสดงวงจรใน Simulink Lab Load Cell

แปลงแรงดันจากรูป 12 Bits เป็นน้ำหนัก (Kg) แบบ Real time ผ่านสมการเส้นตรงที่ได้จากการทดลอง

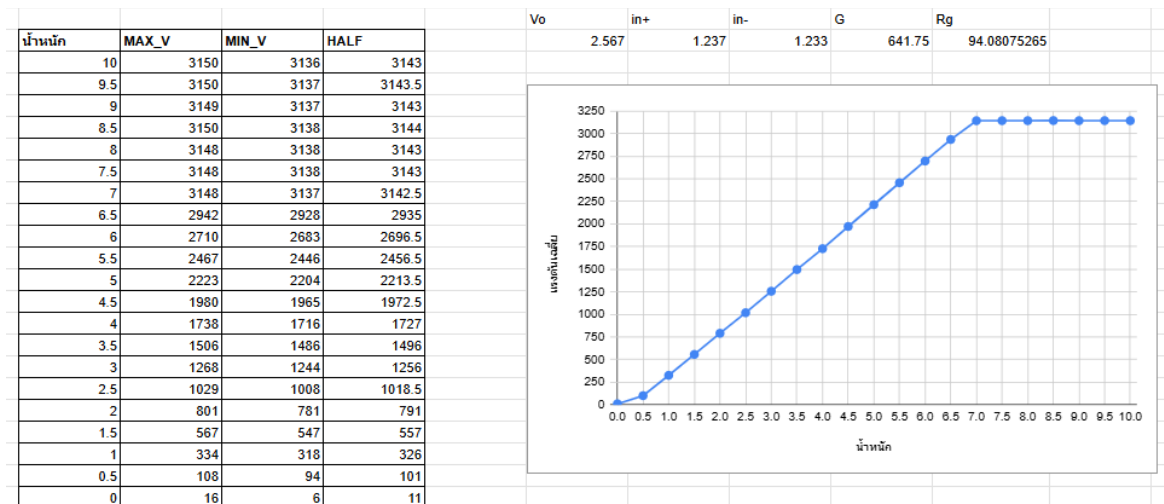
Loadcell Code:

```
1 function y = myFunction(x)
2 if x < 63.5
3     result = equation1(x);
4 else
5     result = equation2(x);
6 end
7
8 y = result ;
9 function out = equation1(x)
10     out = (x-6.6)/113.8; % สมการ 1
11 end
12
13 function out = equation2(x)
14     out = (x+96.57894737)/320.1578947 ; % สมการ 2
15 end
16
17 end
18
```

รูปภาพที่ 57 แสดงโปรแกรมการทำงานของ Loadcell

เป็นโปรแกรมเพื่อทำให้ค่าแรงดันที่ได้จาก Loadcell แปลงเป็น Weight(kg) แบบ Realtime ผ่านสมการเส้นตรง

ผลการทดลองหาช่วง Gain ที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่ช่วง Saturated:



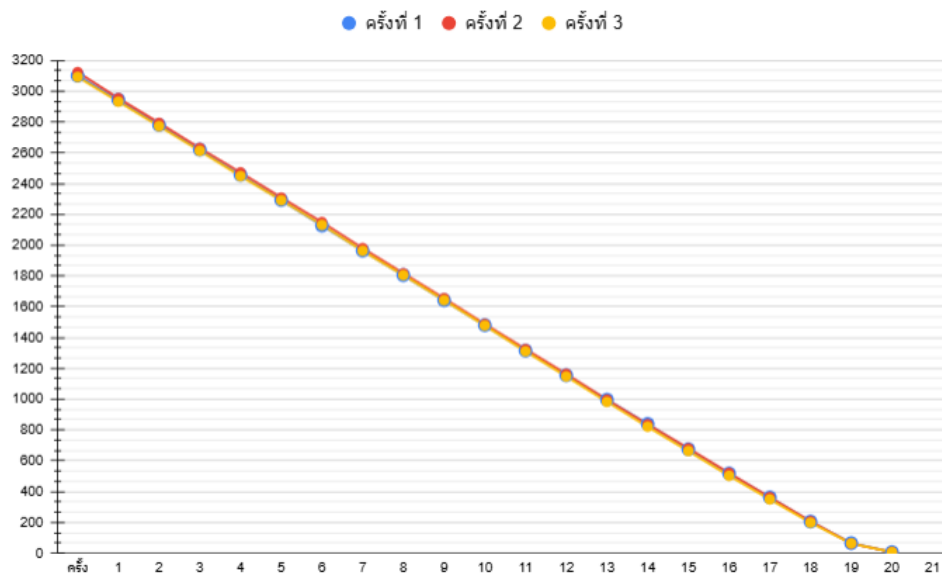
รูปภาพที่ 58 ผลการทดลองหาช่วง Gain ที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่ช่วง Saturated

ตารางทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของ Output และ น้ำหนัก:

| ครั้ง | น้ำหนักจริง | น้ำหนักที่ออกไป | V_1 | น้ำหนักจริง | น้ำหนักที่ออกไป | V_2 | น้ำหนักจริง | น้ำหนักที่ออกไป | V_3 | V_avg |
|-------|-------------|-----------------|-------|-------------|-----------------|-------|-------------|-----------------|------|--------|
| 1 | 9.926 | 0 | 3100 | 9.925 | 0 | 3123 | 9.925 | 0 | 3092 | 3105 |
| 2 | 9.427 | 0.499 | 2944 | 9.422 | 0.503 | 2954 | 9.422 | 0.503 | 2931 | 2943 |
| 3 | 8.929 | 0.498 | 2780 | 8.931 | 0.491 | 2793 | 8.931 | 0.491 | 2772 | 2781.7 |
| 4 | 8.43 | 0.499 | 2620 | 8.923 | 0.499 | 2630 | 8.928 | 0.494 | 2612 | 2620.7 |
| 5 | 7.924 | 0.506 | 2456 | 7.947 | 0.485 | 2472 | 7.931 | 0.506 | 2448 | 2458.7 |
| 6 | 7.43 | 0.494 | 2293 | 7.939 | 0.493 | 2308 | 7.956 | 0.481 | 2291 | 2297.3 |
| 7 | 6.922 | 0.508 | 2127 | 6.972 | 0.482 | 2149 | 6.956 | 0.494 | 2131 | 2135.7 |
| 8 | 6.428 | 0.494 | 1964 | 6.955 | 0.499 | 1980 | 6.947 | 0.503 | 1963 | 1969 |
| 9 | 5.943 | 0.485 | 1805 | 5.974 | 0.499 | 1816 | 5.968 | 0.485 | 1805 | 1808.7 |
| 10 | 5.45 | 0.493 | 1642 | 5.979 | 0.494 | 1655 | 5.954 | 0.499 | 1642 | 1646.3 |
| 11 | 4.965 | 0.485 | 1480 | 4.975 | 0.505 | 1487 | 4.97 | 0.499 | 1478 | 1481.7 |
| 12 | 4.465 | 0.5 | 1315 | 4.987 | 0.493 | 1324 | 4.96 | 0.509 | 1310 | 1316.3 |
| 13 | 3.971 | 0.494 | 1155 | 3.997 | 0.485 | 1164 | 3.963 | 0.498 | 1147 | 1155.3 |
| 14 | 3.489 | 0.482 | 996.5 | 3.974 | 0.508 | 996.5 | 3.961 | 0.5 | 982 | 991.7 |
| 15 | 3.004 | 0.485 | 838.9 | 2.995 | 0.494 | 836.5 | 2.965 | 0.498 | 821 | 832.1 |
| 16 | 2.494 | 0.51 | 674.5 | 3.004 | 0.485 | 680 | 2.969 | 0.494 | 663 | 672.5 |
| 17 | 1.996 | 0.498 | 517.2 | 2.009 | 0.501 | 521 | 1.963 | 0.508 | 502 | 513.4 |
| 18 | 1.506 | 0.49 | 362 | 2.011 | 0.499 | 363 | 1.977 | 0.494 | 349 | 358 |
| 19 | 1.002 | 0.504 | 204.9 | 1.007 | 0.503 | 207 | 0.984 | 0.485 | 198 | 203.3 |
| 20 | 0.504 | 0.498 | 64.5 | 1.001 | 0.509 | 63 | 0.984 | 0.485 | 63 | 63.5 |
| 21 | 0 | 0.504 | 6.5 | 0 | 0.498 | 6.9 | 0 | 0.499 | 6.5 | 6.6 |

รูปภาพที่ 59 ตารางทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของ Output และ น้ำหนัก

กราฟการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของ Output และน้ำหนัก:



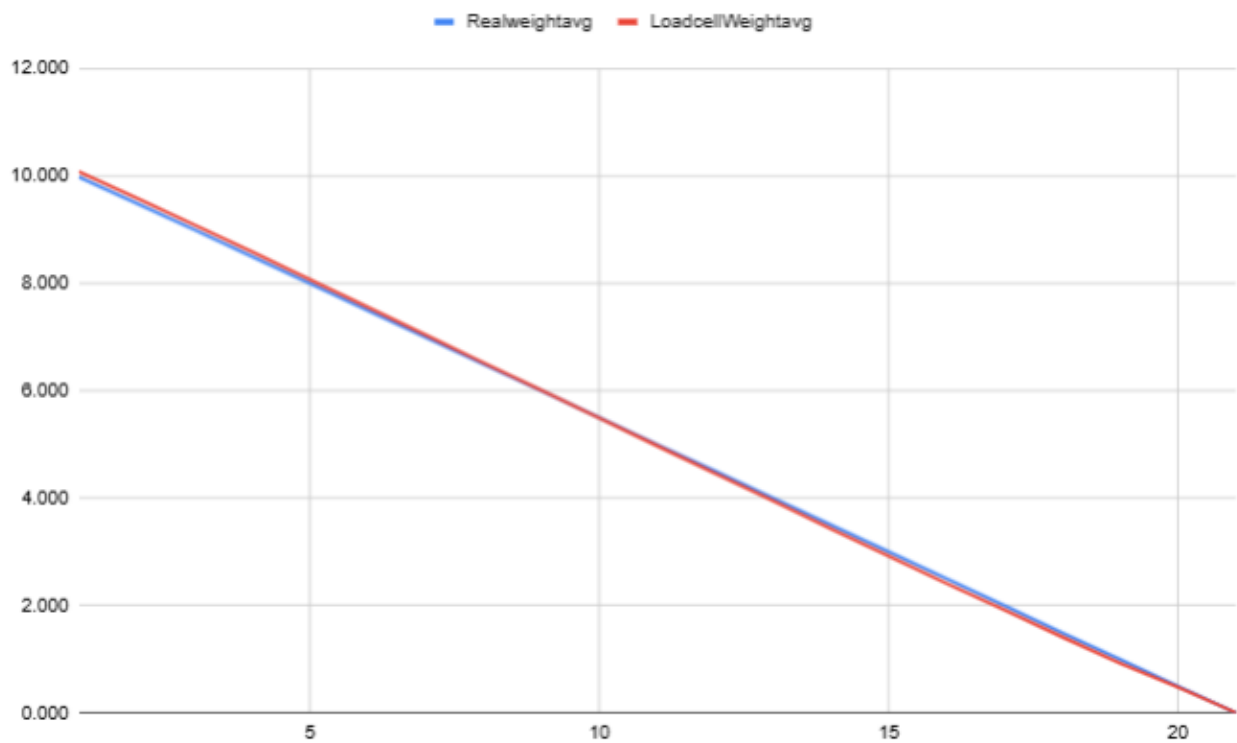
รูปภาพที่ 60 กราฟการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของ Output และ น้ำหนัก

ตารางทดลองผลความคลาดเคลื่อนของ Loadcell เทียบกับ เครื่องชั่ง Digital:

| ครั้ง | Subtracted_Wei | Real_weight1 | Weight_Loadcel | Subtracted_Wei | Real_weight2 | Weight_LoadCe | Subtracted_Wei | Real_weight3 | Weight_Loadcell | Realweightavg | LoadcellWeighta | คลาดเคลื่อน |
|-------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------|
| 1 | 0 | 9.979 | 10.065 | 0 | 9.979 | 10.07 | 0 | 9.976 | 10.08 | 9.978 | 10.072 | 0.094 |
| 2 | 0.503 | 9.476 | 9.568 | 0.484 | 9.495 | 9.597 | 0.503 | 9.473 | 9.58 | 9.481 | 9.582 | 0.100 |
| 3 | 0.485 | 8.991 | 9.07 | 0.504 | 8.991 | 9.089 | 0.484 | 8.989 | 9.087 | 8.990 | 9.082 | 0.092 |
| 4 | 0.504 | 8.487 | 8.568 | 0.492 | 8.499 | 8.584 | 0.504 | 8.485 | 8.576 | 8.490 | 8.576 | 0.086 |
| 5 | 0.505 | 7.982 | 8.054 | 0.504 | 7.995 | 8.064 | 0.493 | 7.992 | 8.071 | 7.990 | 8.063 | 0.073 |
| 6 | 0.499 | 7.483 | 7.538 | 0.505 | 7.49 | 7.551 | 0.499 | 7.493 | 7.554 | 7.489 | 7.548 | 0.059 |
| 7 | 0.5 | 6.983 | 7.025 | 0.498 | 6.992 | 7.037 | 0.505 | 6.988 | 7.035 | 6.988 | 7.032 | 0.045 |
| 8 | 0.502 | 6.481 | 6.501 | 0.5 | 6.492 | 6.519 | 0.498 | 6.49 | 6.522 | 6.488 | 6.514 | 0.026 |
| 9 | 0.494 | 5.987 | 5.993 | 0.5 | 5.992 | 5.999 | 0.496 | 5.994 | 6.008 | 5.991 | 6.000 | 0.009 |
| 10 | 0.502 | 5.485 | 5.477 | 0.501 | 5.491 | 5.486 | 0.493 | 5.501 | 5.497 | 5.492 | 5.487 | -0.006 |
| 11 | 0.495 | 4.99 | 4.964 | 0.494 | 4.997 | 4.974 | 0.5 | 5.001 | 4.975 | 4.996 | 4.971 | -0.025 |
| 12 | 0.499 | 4.491 | 4.448 | 0.496 | 4.501 | 4.464 | 0.494 | 4.507 | 4.468 | 4.500 | 4.460 | -0.040 |
| 13 | 0.492 | 3.999 | 3.943 | 0.495 | 4.006 | 3.949 | 0.501 | 4.006 | 3.947 | 4.004 | 3.946 | -0.057 |
| 14 | 0.498 | 3.501 | 3.429 | 0.493 | 3.513 | 3.443 | 0.516 | 3.49 | 3.413 | 3.501 | 3.428 | -0.073 |
| 15 | 0.496 | 3.005 | 2.923 | 0.501 | 3.012 | 2.929 | 0.509 | 2.981 | 2.897 | 2.999 | 2.916 | -0.083 |
| 16 | 0.493 | 2.512 | 2.426 | 0.509 | 2.503 | 2.418 | 0.501 | 2.48 | 2.393 | 2.498 | 2.412 | -0.086 |
| 17 | 0.516 | 1.996 | 1.913 | 0.498 | 2.005 | 1.922 | 0.494 | 1.986 | 1.903 | 1.996 | 1.913 | -0.083 |
| 18 | 0.509 | 1.487 | 1.41 | 0.517 | 1.488 | 1.413 | 0.498 | 1.488 | 1.412 | 1.488 | 1.412 | -0.076 |
| 19 | 0.495 | 0.992 | 0.926 | 0.495 | 0.993 | 0.9268 | 0.495 | 0.993 | 0.9258 | 0.993 | 0.926 | -0.066 |
| 20 | 0.494 | 0.498 | 0.478 | 0.499 | 0.494 | 0.473 | 0.498 | 0.495 | 0.469 | 0.496 | 0.473 | -0.022 |
| 21 | 0.498 | 0 | 0 | 0.494 | 0 | 0 | 0.495 | 0 | 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

รูปภาพที่ 61 ตารางทดลองผลความคลาดเคลื่อนของ Loadcell เทียบกับ เครื่องชั่ง Digital

กราฟแสดงผลการทดลองผลความคลาดเคลื่อนของ Loadcell เทียบกับ เครื่องชั่ง Digital:



รูปภาพที่ 62 กราฟแสดงผลการทดลองผลความคลาดเคลื่อนของ Loadcell เทียบกับ เครื่องชั่ง Digital

Link github

<https://github.com/thanadonDD/LAB1RMX/tree/main>