

RMXplorer RMXplorer

LAB 1: Sensors

Name

- นางสาวกิตติณัฐ ช่างทำ 67340500003
- นายศัพพัฒน์ บุณศรีสุนทร 67340500033
- นายรัชชานนท์ อนุรักษ์ทรัพย์ 67340500034

Objectives

- ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการทำงานและคุณสมบัติของเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ ที่ใช้งานในระบบเมคคาทรอนิกส์และระบบตรวจวัดได้อย่างถูกต้อง ตลอดจนเข้าใจปริมาณทางฟิสิกส์ที่เซนเซอร์รับรู้และแปลงสัญญาณได้ในแต่ละขั้นตอน
- ผู้เรียนสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Input และ Output รวมถึงพฤติกรรมตอบสนองของเซนเซอร์เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะหรือเงื่อนไขที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งอธิบายความหมายของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้ เช่น ความไว (Sensitivity) ช่วงการวัด (Range) และความละเอียด (Resolution)
- ผู้เรียนสามารถเชื่อมต่อเซนเซอร์เข้ากับระบบวัดสัญญาณ เช่น ADC หรือวงจรประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น รวมถึงสามารถอ่านค่าที่ได้จากเซนเซอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์หรือซอฟต์แวร์วิเคราะห์ข้อมูลได้
- ผู้เรียนสามารถดำเนินการประมวลผลข้อมูลจากการทดลองได้อย่างถูกต้อง เช่น การกรองสัญญาณรบกวน การหาค่าเฉลี่ย การแปลงค่าจากแรงดันเป็นค่าทางฟิสิกส์ รวมถึงการนำเสนอผลลัพธ์ทั้งในรูปแบบกราฟ ตาราง หรือเชิงตัวเลขตามหลักการทางสถิติและคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม
- ผู้เรียนสามารถประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในระบบควบคุมและงานวัดจริง เช่น การวัดตำแหน่งเชิงมุมด้วย Encoder การตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วย Hall Sensor และการวัดน้ำหนักด้วย Load Cell พร้อมอธิบายหลักการทำงานตั้งแต่ต้นทาง (แรง/สนาม/การเคลื่อนที่) จนถึงปลายทาง (สัญญาณไฟฟ้า/ค่าที่อ่านได้) ได้อย่างถูกต้องและมีเหตุผลรองรับ

1. Sensors (4 LABS)

การทดลองที่ 1 Potentiometer

จุดประสงค์

1. ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการทำงานของ Potentiometer ประเภทต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกกับตำแหน่งเชิงเส้นหรือองศาการหมุนของแกนปรับ
2. ผู้เรียนสามารถเชื่อมต่อและใช้งาน Potentiometer ในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องตามหลักการทางวงจรไฟฟ้า รวมถึงเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของงานวัดหรืองานควบคุม
3. ผู้เรียนสามารถวัดและประมวลผลสัญญาณไฟฟ้าจาก Potentiometer ได้ เช่น การแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ผ่านวงจรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลหรือวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบ
4. ผู้เรียนสามารถประยุกต์ใช้ Potentiometer ในการวัดตำแหน่งเชิงมุมหรือระยะทางในระบบจริงได้ พร้อมอธิบายหลักการแปลงสัญญาณจากการเคลื่อนที่เชิงกลไปเป็นข้อมูลเชิงไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติหรือการตรวจวัดต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

สมมติฐาน

เมื่อหมุน Knob ของ Potentiometer ไปในแต่ละตำแหน่ง ค่าความต้านทานและแรงดัน Output จะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนเชิงเส้น และหากนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย (Mean) จากสัญญาณ จะสามารถสร้างสัญญาณขึ้นบันไดที่แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งกับแรงดันได้อย่างสม่ำเสมอ

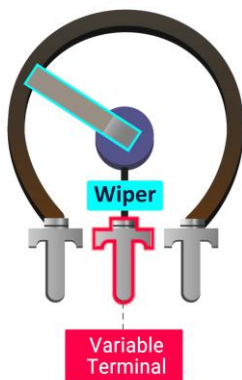
ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ตำแหน่งของการปรับค่าบน Potentiometer ได้แก่
 - องศาการหมุนของ Rotary Potentiometer (ปรับทีละ 5 องศา)
 - ระยะการเลื่อนของ Linear Potentiometer (ปรับทีละ 5 มิลลิเมตร)
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าที่ได้จากการทดลองของ Potentiometer ได้แก่
 - ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่อ่านได้ผ่านระบบ ADC
 - ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการปรับ
3. ตัวแปรควบคุม:
 - ค่าที่ได้จากการทดลองของ Potentiometer ได้แก่
 - ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่อ่านได้ผ่านระบบ ADC
 - ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการปรับ

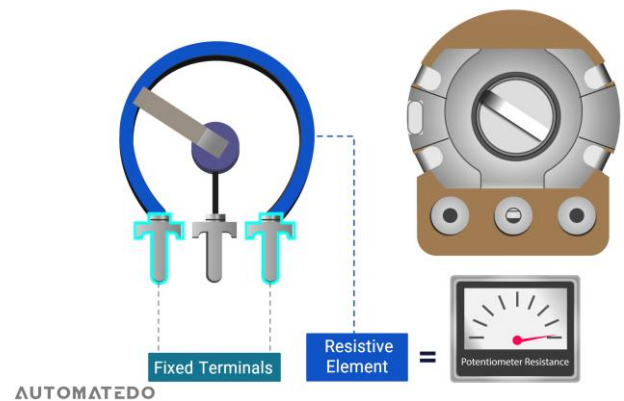
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Potentiometer

โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ที่มี 3 ขา ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ แผ่นตัวต้านทาน (Resistive Element), ขั้วปลายคงที่สองขั้ว (Fixed Terminals) ที่ต่ออยู่ปลายทั้งสองของแผ่นตัวต้านทาน และ ตัวเลื่อน (Wiper) ที่สัมผัสและเลื่อนบนแผ่นตัวต้านทานได้ ค่าความต้านทานรวมของโพเทนชิโอมิเตอร์เรียกว่า Total Resistance เมื่อ Wiper เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ค่าความต้านทานระหว่าง Wiper กับขั้วปลายแต่ละด้านจะเปลี่ยนไป ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนตามสัดส่วนของตำแหน่งนั้น ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 1 Wiper



รูปที่ 2 Potentiometer Components

ในโพเทนชิโอมิเตอร์ ขั้วปลายทั้งสองจะเชื่อมต่อกับแผ่นตัวต้านทานทั้งหมด ส่วนขั้วตรงกลางคือ Wiper ซึ่งทำหน้าที่แบ่งความต้านทานออกเป็นสองส่วน คือค่าความต้านทานจาก Wiper ไปยังปลายด้านหนึ่ง และค่าความต้านทานจาก Wiper ไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ปลายทั้งสองของแผ่นตัวต้านทาน แรงดันที่ขา Wiper จะถูกแบ่งสัดส่วนตามค่าความต้านทานทั้งสองส่วน ทำให้โพเทนชิโอมิเตอร์ทำงานเหมือนวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) สมการแรงดันขาออก:

$$V_{out} = V_{in} \times \left(\frac{R_w}{R_t} \right)$$

โดยที่:

V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า

R_w คือ ค่าความต้านทานจากปลายตัวต้านทานถึงตำแหน่งของ Wiper

R_t คือ ค่าความต้านทานรวมของโพเทนชิโอมิเตอร์

2. ชนิดของ Potentiometer ทั้งหมด

Potentiometer สามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบหลักตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ แบบหมุน (Rotary Potentiometer) และ แบบเลื่อน (Linear Potentiometer) โดยทั้งสองแบบทำงานด้วยหลักการเดียวกัน คือมีแถบตัวต้านทาน (Resistive Element) เชื่อมต่อกับปลายคงที่สองจุด และมีตัวเลื่อนสัมผัส (Wiper) เป็นจุดเคลื่อนที่ เมื่อผู้ใช้หมุนหรือเลื่อนตัวควบคุม Wiper จะเคลื่อนผ่านแถบตัวต้านทาน ทำให้ค่า

ความต้านทานและแรงดันไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนไปตามตำแหน่ง นำไปใช้ในการควบคุมสัญญาณ เช่น การปรับระดับเสียง การปรับความสว่าง การ calibrate ค่าในวงจร หรือการตั้งค่าความไวของเซนเซอร์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สำหรับ **Rotary Potentiometer** เป็นชนิดที่พบได้บ่อยที่สุด ใช้การหมุนแกนหรือลูกบิดเพื่อปรับตำแหน่งของ Wiper ตัวอย่างเช่น

- PDB181-K420K-103A2 ใช้ Taper แบบ Audio (A) เหมาะกับการปรับ Volume หรือ Gain Control
- PDB181-K420K-103B ใช้ Taper แบบ Linear (B) เหมาะกับการปรับสัญญาณเชิงเส้น
- PDB181-K420K-103C ใช้ Taper แบบ Reverse Logarithmic (C) เหมาะกับการปรับ Balance หรือ Fine Adjustment

การตอบสนองของ Rotary Potentiometer: การหมุนแกนจะเปลี่ยนแรงดันขาออกตามสัดส่วนของ Taper เช่น Taper A (Audio) จะเปลี่ยนแรงดันแบบ logarithmic เหมาะกับการปรับระดับเสียงให้สอดคล้องกับการรับรู้ของมนุษย์ ส่วน Taper B (Linear) แรงดันจะเปลี่ยนแบบเส้นตรงเหมาะกับการปรับสัญญาณเชิงเส้น และ Taper C (Reverse Logarithmic) ให้การปรับละเอียดที่ส่วนท้ายของช่วงแรงดัน เหมาะกับการปรับ Balance หรือ Fine Adjustment

ส่วน **Linear Potentiometer** ใช้การเลื่อน Wiper ไปตามรางตัวต้านทานในแนวเส้นตรง ทำให้ค่าที่ปรับมีตำแหน่งชัดเจนและสามารถควบคุมสัญญาณได้แม่นยำ ตัวอย่างเช่น

- PTA6043-2015DPA103 ใช้ Taper แบบ Audio (A) เหมาะกับ Fader สำหรับปรับระดับเสียง
- PTA6043-2015DPB103 ใช้ Taper แบบ Linear (B) เหมาะกับการปรับแรงดันหรือสัญญาณแบบเส้นตรง

การตอบสนองของ Linear Potentiometer: การเลื่อน Wiper จะเปลี่ยนแรงดันขาออกตามตำแหน่งบนแถบตัวต้านทานโดยตรง เช่น Slide Pot ขนาด 15–60 mm จะให้แรงดันขาออกเปลี่ยนจาก 0 – V_{cc} อย่างเป็นเชิงเส้น ส่วน Motorized Fader จะสามารถเลื่อนอัตโนมัติและบันทึกตำแหน่ง ทำให้เรียกคืนค่าแรงดันขาออกเดิมได้ทั้งสองรูปแบบนี้มีข้อดีและการใช้งานเฉพาะตัว โดย Rotary Potentiometer เหมาะกับการปรับสัญญาณที่ต้องการหมุนปรับแบบต่อเนื่องหรือปรับแบบโลจาร์ทึม ส่วน Linear Potentiometer เหมาะกับการปรับค่าที่ต้องการความแม่นยำสูงหรือควบคุมตำแหน่งให้ชัดเจน

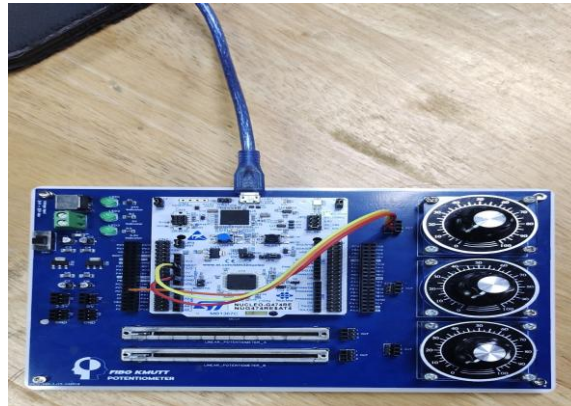
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมอุปกรณ์ดังนี้

- | | |
|---|-------------------------|
| 1.1. PTA6043-2015DPA103 | 1.4. PDB181-K420K-103B |
| 1.2. PTA6043-2015DPB103 | 1.5. PDB181-K420K-103C |
| 1.3. PDB181-K420K-103A2 | 1.6. NUCLEO STM32G474RE |
| 1.7. PotenXplorer – ฐานบรรจุปอร์ตควบคุม อุปกรณ์ต่าง ๆ และ 3D-Printed Part สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทรกเตอร์ | |
| 1.8. สายจัมเปอร์ | |

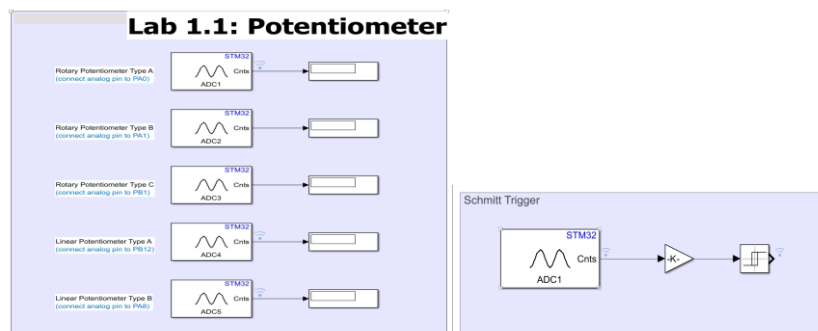
2. เตรียมวงจรเชื่อมต่อ Potentiometer เข้ากับบอร์ดอ่านค่า ADC

ทำการต่อขา V_{CC} , GND และขาสัญญาณกลาง (Wiper) ของ Potentiometer เข้ากับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE



รูปที่ 3 Potentiometer Board

จากนั้นตั้งค่าบล็อก Analog to Digital Converter (ADC) ในโปรแกรม Simulink เพื่อให้สามารถอ่านค่าสัญญาณแรงดันแบบ Analog และแปลงเป็นค่าสัญญาณดิจิทัลได้



รูปที่ 4 Potentiometer Lab Simulink Code Blocks

** จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้เพื่อให้ระบบพร้อมรับสัญญาณจาก Potentiometer อย่างถูกต้องและมีความเสถียร

3. หมุนปุ่ม Knob หรือเลื่อนแกนของ Linear Potentiometer ไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดค่า

กำหนดตำแหน่งการวัด เช่น การหมุน Rotary Potentiometer ที่ละช่วงคงที่ (เช่น ทุกๆ 10%) หรือ การเลื่อน Linear Potentiometer ที่ละระยะคงที่ (เช่น 5 มม. ต่อครั้ง) โดยทำการหยุดในแต่ละตำแหน่งเพื่อเตรียมเก็บข้อมูล เพื่อให้ทุกค่าที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งทางกายภาพที่ชัดเจน



รูปที่ 5 การทดลอง Potentiometer

4. ใช้ระบบ ADC อ่านค่าแรงดันในแต่ละตำแหน่ง

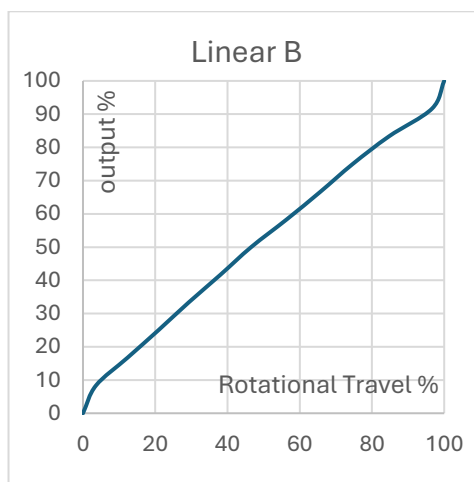
เมื่อ Potentiometer อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด ให้ใช้บล็อก ADC อ่านค่าแรงดันที่ได้และแปลงเป็นค่าสัญญาณดิจิทัล โดยค่า ADC ที่อ่านได้จะอยู่ในช่วง 0 – 4095 (สำหรับ ADC แบบ 12-bit)

5. สังเกตสัญญาณที่ได้จาก ADC และส่งออกไปยัง Workspace

ใช้บล็อก To Workspace หรือ Data Inspector เพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณจากแต่ละตำแหน่ง โดยในแต่ละตำแหน่งจะทำการบันทึกข้อมูลจำนวน 1000 ค่า เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน

6. นำค่าที่ได้จากแต่ละตำแหน่งมา Plot กราฟ

นำข้อมูลค่าเฉลี่ยจากแต่ละตำแหน่งไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการหมุนหรือระยะการเคลื่อนกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ อาจดำเนินการในโปรแกรม Excel หรือ MATLAB



รูปที่ 6 กราฟตัวอย่างจากการทดลอง

7. ตรวจสอบลักษณะกราฟที่ได้และวิเคราะห์ผล

ตรวจสอบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับตำแหน่งที่เปลี่ยนไปอย่างสม่ำเสมอหรือไม่ โดยหากเป็น Linear Potentiometer กราฟที่ได้ควรมีความเป็นเชิงเส้นสูง ในขณะที่ Rotary Potentiometer จะมีกราฟที่สะท้อนความสัมพันธ์ตามโครงสร้างและการออกแบบของตัวอุปกรณ์

ผลการทดลอง

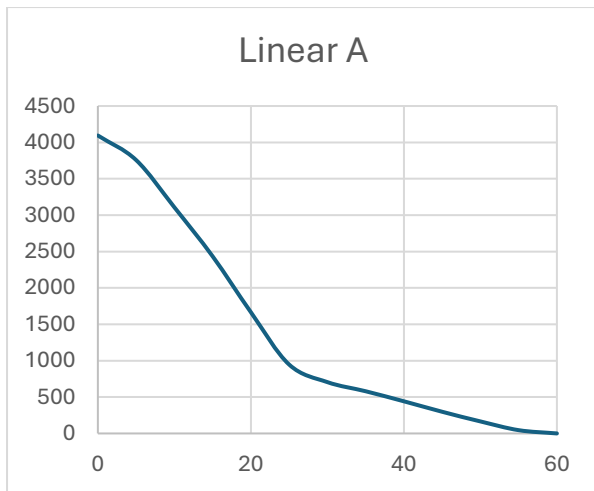
1. ผลการทดลองที่ 1 ชนิดของ Potentiometer

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer

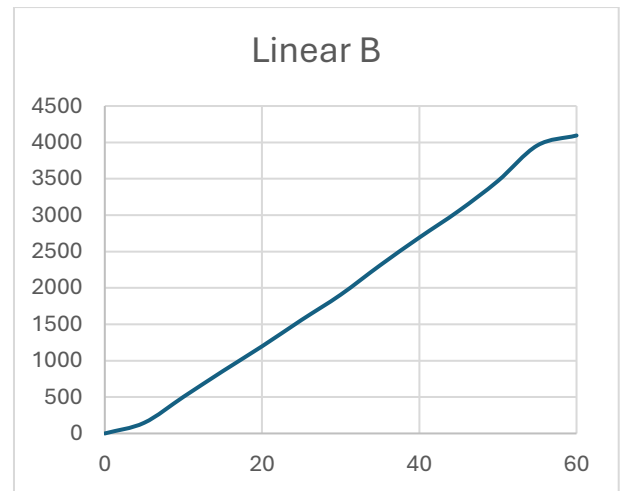
Linear Potentiometer ทำการเก็บค่า ADC ที่ได้จาก Linear Potentiometer ตัวที่ A และ B

ตารางที่ 1 Linear Potentiometer ตัวที่ A และ B

ตำแหน่ง (mm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
A	4095	3757	3107	2434	1666	947	705	579	441	298	165	45	0
B	0	146	502	855	1197	1558	1906	2309	2691	3057	3470	3957	4095



กราฟที่ 1 กราฟผลการทดลอง Linear Potentiometer 1

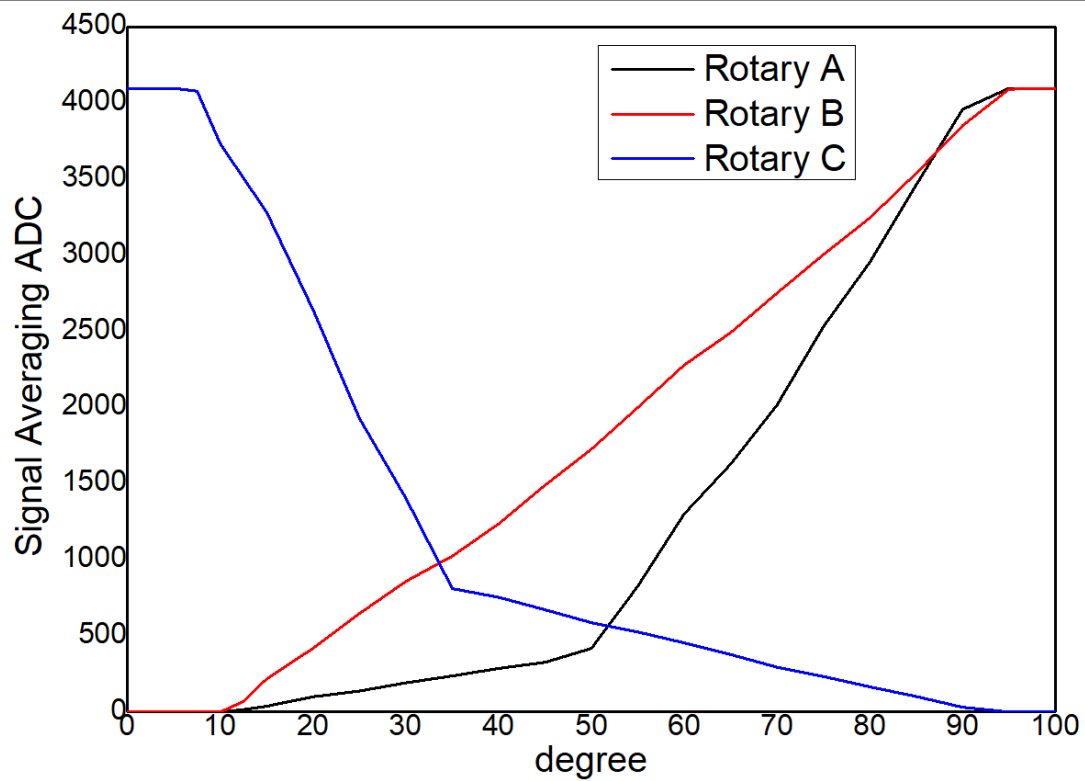


กราฟที่ 2 กราฟผลการทดลอง Linear Potentiometer 2

Rotary Potentiometer ทำการเก็บค่า ADC ที่ได้จาก Rotary Potentiometer ตัวที่ A B และ C

ตารางที่ 2 Rotary Potentiometer ตัวที่ A B และ C

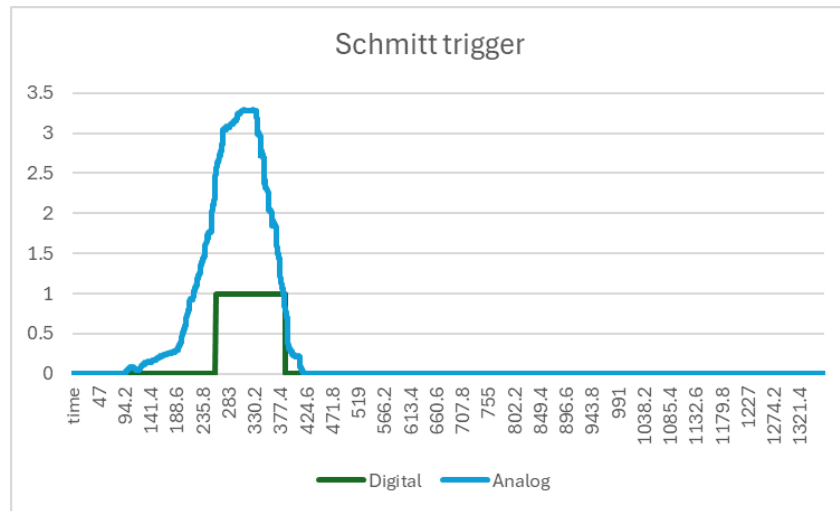
สเกล	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A	0	0	100	191	286	417	1300	2015	2952	3956	4095
B	0	0	418	857	1235	1725	2278	2751	3243	3850	4095
C	4095	3729	2638	1404	753	586	454	294	164	30	0



กราฟที่ 3 กราฟผลการทดลองจาก Rotary Potentiometer A B C

2. ผลการทดลองที่ 2 ทดลองวงจร Schmitt Trigger

การทดลองการต่อ Simulink block เพื่อสร้างวงจร Schmitt Trigger ทำให้ค่าที่สูงกว่า 2.45 มีสถานะเป็น HIGH และ ทำให้ค่าที่ต่ำกว่า 0.825 มีสถานะเป็น LOW

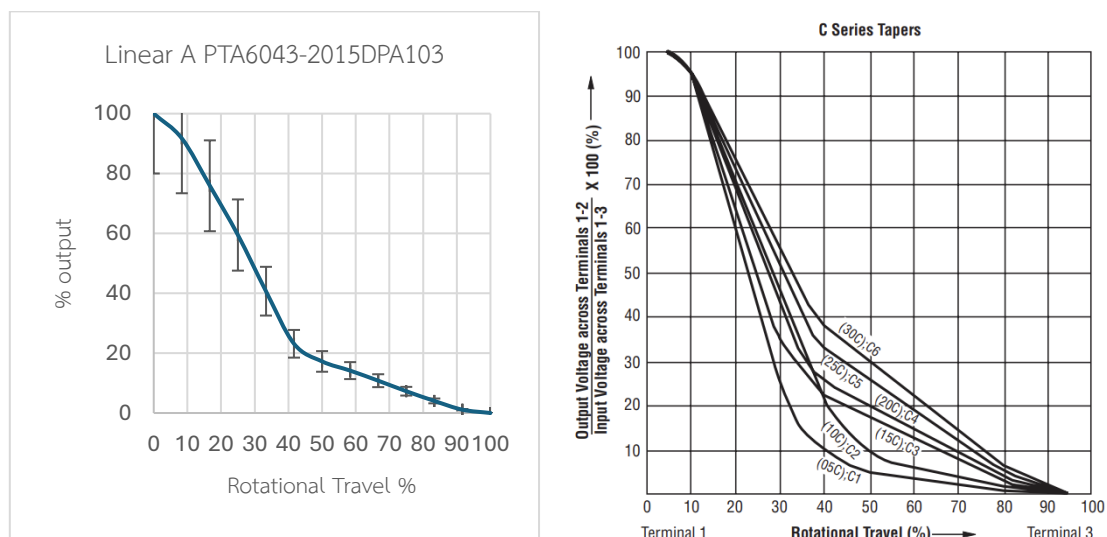


กราฟที่ 4 Schmitt Trigger

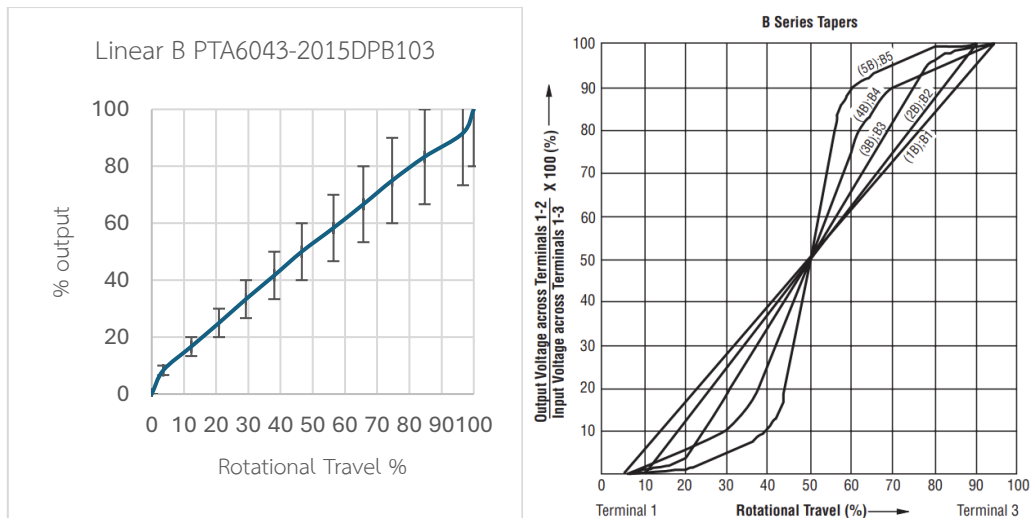
สรุปผลการทดลอง

1. Linear Potentiometer

จากตารางผลการทดลองและกราฟที่นำค่าไป plot พบว่า มีความใกล้เคียงกับ ข้อมูลและกราฟใน datasheet ดังนี้



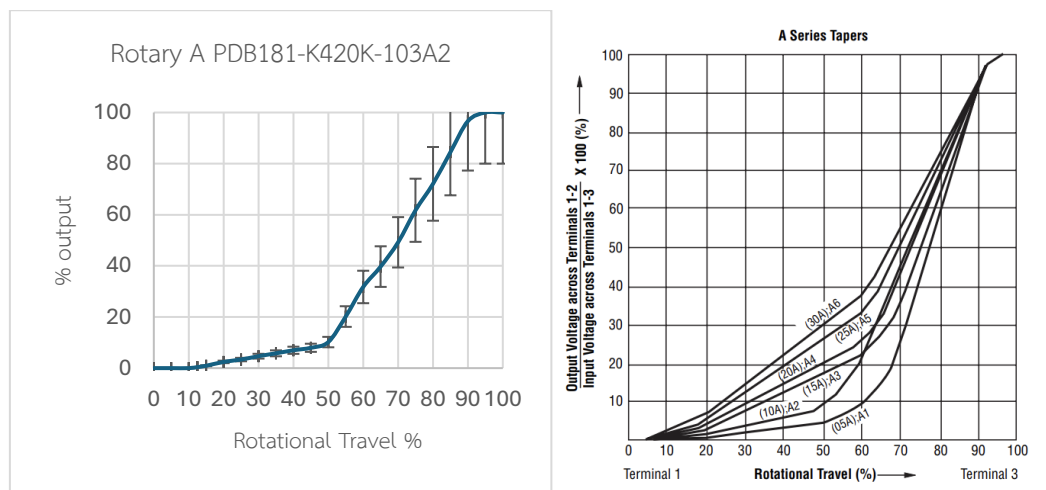
กราฟที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Potentiometer C type เมื่อเทียบกับ Datasheet



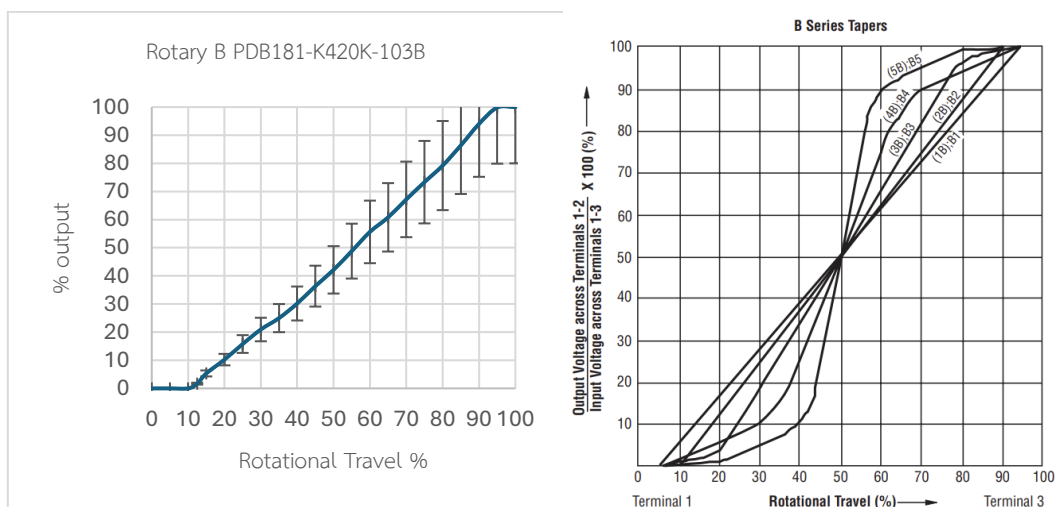
กราฟที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Potentiometer B type เมื่อเทียบกับ Datasheet

2. Rotary Potentiometer

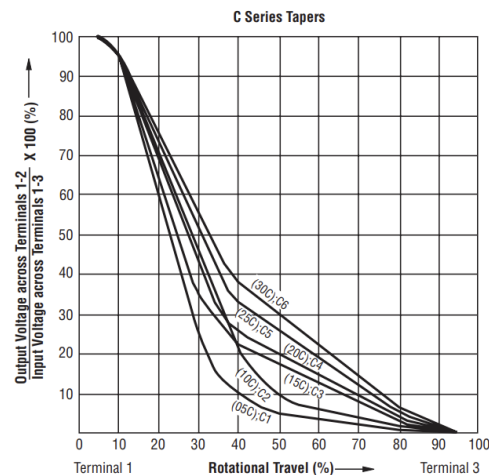
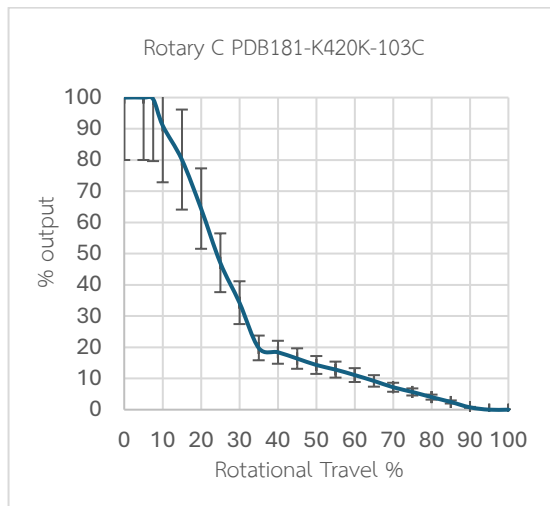
จากตารางผลการทดลองและกราฟที่นำค่าไป plot พบว่า มีความใกล้เคียงกับ ข้อมูลและกราฟใน datasheet ดังนี้



กราฟที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Potentiometer A type เมื่อเทียบกับ Datasheet



กราฟที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Potentiometer B type เมื่อเทียบกับ Datasheet



กราฟที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล Potentiometer C type เมื่อเทียบกับ Datasheet

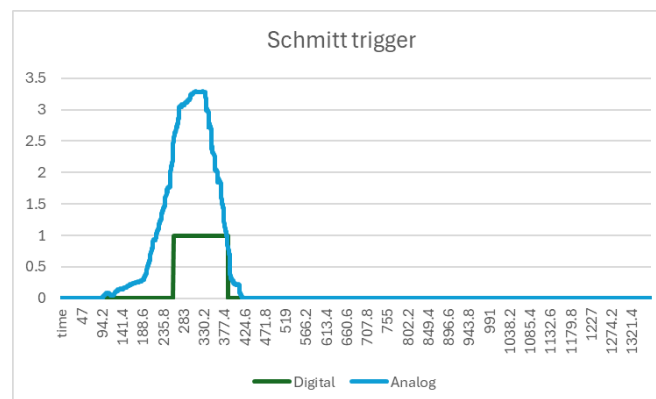
ผลการทดลองออกมาใกล้เคียงกับข้อมูล ใน Datasheet โดยค่าของ Potentiometer A type ให้กราฟแบบ Log หรือ exponential Potentiometer B type ให้กราฟแบบ linear และ Potentiometer C type มีค่ากราฟแบบ Inverse log

Electrical Characteristics	Electrical Characteristics
Taper..... Linear, audio	Taper..... Linear, audio
Standard Resistance Range	Standard Resistance Range
..... 1 K ohms to 1 M ohms 1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance..... $\pm 20\%$	Standard Resistance Tolerance
Residual Resistance $R \leq 1K \Omega \pm 30\%$
..... 500 ohms or 1 % max. $1K \Omega < R < 1M \Omega \pm 20\%$
Insulation Resistance $\geq 1M \Omega \pm 30\%$
..... Min. 100 megohms at 250 V DC	Residual Resistance 1 % max.

รูปที่ 7 Linear&Rotary Potentiometer Tolerance for Rotary and Linear

จากข้อมูลที่ได้จาก datasheet จะมี error bar $\pm 20\%$ ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ยอมรับได้

3. Schmitt Trigger



กราฟที่ 10 Schmitt Trigger

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า ชนิดของ Potentiometer ส่งผลโดยตรงต่อ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก เมื่อมีการหมุนหรือปรับตำแหน่ง โดยค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลใน Datasheet ของผู้ผลิต และมีความคลาดเคลื่อนเพียง $\pm 20\%$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานอุปกรณ์ประเภทนี้

Linear Potentiometer พบว่า

ตัว A ให้ลักษณะกราฟแบบ *Inverse Logarithmic*

ตัว B ให้กราฟแบบ *Linear*

Rotary Potentiometer พบว่า

ตัว A ให้กราฟแบบ *Logarithmic* หรือ *Exponential*

ตัว B ให้กราฟแบบ *Linear*

ตัว C ให้กราฟแบบ *Inverse Logarithmic*

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของ Potentiometer ที่กำหนด “ลักษณะของ Taper” แตกต่างกันตามชนิดของตัวต้านทาน เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เช่น การควบคุมระดับเสียง (ต้องการ *Logarithmic*) หรือการปรับค่าทั่วไป (ต้องการ *Linear*)

จากการทดลองวงจร **Schmitt Trigger** พบว่า เมื่อสัญญาณอินพุตที่ผ่านการแปลงจาก ADC (**Analog-to-Digital Converter**) ถูกนำมาแปลงกลับเป็นแรงดันไฟฟ้า พบว่ามีพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะเอาต์พุต (Output State) ก็ต่อเมื่อแรงดันอินพุตถึงค่าที่กำหนดไว้ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อแรงดันอินพุต มากกว่า 2.475 V → เอาต์พุตของ Schmitt Trigger จะอยู่ในสถานะ High (Logic 1)
- เมื่อแรงดันอินพุต น้อยกว่า 0.825 V → เอาต์พุตของ Schmitt Trigger จะอยู่ในสถานะ Low (Logic 0)

ค่าทั้งสองนี้คือ **Threshold Voltage** ที่กำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนสถานะในวงจร เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นเมื่อแรงดันอินพุตอยู่ใกล้ค่ากลาง และทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกที่มีการแกว่งหรือสัญญาณรบกวนให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความเสถียรและชัดเจน

ข้อเสนอแนะ

1. ในส่วนของ Rotary Potentiometer ควรหาอุปกรณ์ที่ช่วยทำให้การอ่านสเกลแม่นยำขึ้นมาใช้

อ้างอิง

- <https://www.digikey.co.th/th/articles/the-complete-guide-to-potentiometers>
- <https://dadaoenergy.com/th/blog/potentiometer-definition/>
- <https://youtu.be/sWbSeJmUFfw?si=YPPDD2-7-zXppwCK>
- <https://th.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PTA60432015DPB103?qs=U%2FacTlguyxYM6XeKwlsltg%3D%3D>
- [PTA Series Low Profile Slide Potentiometer](#)
- <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/pdb18.pdf>

การทดลองที่ 2 Incremental Encoder

จุดประสงค์

1. ผู้เรียนสามารถศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder ในโหมดการนับ X1, X2 และ X4 ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงเข้าใจกลไกการอ่านตำแหน่งเชิงเพิ่ม (Incremental Position Measurement)
2. ผู้เรียนสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของการอ่านสัญญาณในแต่ละโหมด (X1, X2 และ X4) ได้ ทั้งในด้านจำนวน Pulse ที่นับได้และความละเอียดของตำแหน่งที่เกิดขึ้น เพื่อใช้เลือกโหมดให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริง
3. ผู้เรียนสามารถอ่านและนำสัญญาณ Output ของ Encoder ไปใช้งานร่วมกับระบบควบคุมหรือระบบตรวจวัดได้อย่างเหมาะสม โดยพิจารณาจากรูปแบบการประมวลผลสัญญาณและความต้องการของแอปพลิเคชันที่นำไปใช้

สมมติฐาน

การเลือกโหมด X1, X2 หรือ X4 ส่งผลต่อปริมาณ Pulse ต่อรอบ (resolution) ที่สามารถอ่านได้ ยิ่งโหมดสูง Resolution ยิ่งละเอียด แต่สัญญาณรบกวน/ความถี่สูงจะมีผลต่อเสถียรภาพของข้อมูล

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น

ตัวแปรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ Encoder ได้แก่ องศาการหมุนของเพลลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลให้จำนวน Pulse ที่ Encoder สร้างออกมาเปลี่ยนแปลงตามการหมุน โหมดและวิธีที่ใช้ในการอ่านสัญญาณจาก Encoder ได้แก่ โหมด X1, X2 และ X4 รวมถึงการอ่านค่าแบบ QEI (Quadrature Encoder Interface)

2. ตัวแปรตาม

ค่าที่เกิดขึ้นจากตัวแปรต้นและเป็นผลลัพธ์ของการทดลอง ได้แก่ จำนวน Pulse ที่นับได้จาก Encoder เมื่อเพลลาหมุนไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งสะท้อนลักษณะของสัญญาณ Output ลักษณะของสัญญาณและความละเอียดของข้อมูลที่อ่านได้จากแต่ละวิธีการอ่าน (QEI) และจากแต่ละโหมดการนับ (X1, X2, X4)

3. ตัวแปรควบคุม

อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง เช่น แหล่งจ่ายไฟ Encoder, ระดับแรงดัน Output, และการคงเฟสของสัญญาณ A และ B

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Incremental Encoder เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุ เช่น ระยะทาง ความเร็ว และมุมหมุน โดยไม่สามารถบอกตำแหน่งสัมบูรณ์ของวัตถุได้ การทำงานของ Incremental Encoder ใช้หลักการของแสงหรือสนามแม่เหล็กร่วมกับแผ่นดิสก์หมุนที่มีช่องว่าง (slots) หรือร่อง ตัว Wiper หรือ transducer จะตรวจจับการผ่านของแสงหรือสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของดิสก์ ส่งผลให้เกิด **สัญญาณพัลส์ (Pulse signal)** ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ทั้งแบบสี่เหลี่ยม (square wave) หรือแปลงเป็น sine/cosine wave ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

สำหรับ **Incremental Rotary Encoder** แผ่นดิสก์จะมีช่องว่างเรียงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับการวัดแบบ increment ซึ่งหมายถึงว่าทุก ๆ การหมุนของเพลาลังสร้างสัญญาณ output ตามจำนวนพัลส์ต่อรอบ (Pulses per Revolution, PPR) การหมุนของเพลานี้สามารถวัดได้โดยการตรวจจับแสงผ่าน optical transducer หรือการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กใน magnetic encoder จากสัญญาณ Pulse เหล่านี้ สามารถคำนวณได้ทั้ง:

- ระยะการหมุน
- ความเร็วในการหมุน
- ทิศทางการหมุน (เมื่อมี 2 ช่องสัญญาณ A/B offset 90° กัน)

ในขณะที่ **Linear Incremental Encoder** ใช้หลักการเดียวกัน แต่ตรวจจับการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง แทนการหมุนของดิสก์ โดย transducer จะอ่านสัญญาณจากแถบสเกลหรือตัวต้านทาน การอ่านสัญญาณ Pulse แบบ offset 90° ช่วยให้สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้

ลักษณะสัญญาณจาก Incremental Encoder

- เป็นพัลส์เชิงไฟฟ้า (Pulse) สามารถอ่านได้แบบ square wave, sine หรือ cosine
- จำนวนพัลส์ต่อรอบ (PPR) ขึ้นกับความละเอียดของดิสก์หรือสเกล
- สามารถมี 1-3 ช่องสัญญาณเพื่ออ่านทิศทางและตำแหน่งแบบ relative
- สัญญาณสามารถใช้งานร่วมกับวงจร TTL, HTL หรือเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ sine/cosine

ข้อดีของ Incremental Encoder

- ราคาถูกและติดตั้งง่าย
- ให้ข้อมูลตำแหน่ง, ระยะ, ความเร็ว และทิศทางแบบ real-time
- ปรับสเกลได้ยืดหยุ่น ใช้ได้ทั้งงานขนาดเล็กและงานอุตสาหกรรม

สัญญาณและการอ่านค่า (Signal and Reading)

Incremental Encoder ส่งออกสัญญาณเป็นพัลส์ (Pulse) โดยทั่วไปมีสองช่องสัญญาณหลักคือ **A** และ **B** ซึ่งเรียง offset กัน 90° (Quadrature) ทำให้สามารถอ่านทิศทางการหมุนของเพลหรือการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ การอ่านสัญญาณ Quadrature มีรูปแบบที่นิยมใช้ 3 แบบคือ **X1**, **X2** และ **X4**:

- **X1**: นับ pulse เฉพาะขาขึ้นของสัญญาณ A
- **X2**: นับ pulse ทั้งขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ A
- **X4**: นับ pulse ทั้งขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ A และ B ช่วยเพิ่มความละเอียดสูงสุด

นอกจากนี้ Phase Relationship ของสัญญาณ A/B จะช่วยบอก **ทิศทางการหมุน** หากสัญญาณ A นำ B หมุนไปทางหนึ่ง หาก B นำ A หมุนไปอีกทางหนึ่ง สัญญาณเหล่านี้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจร TTL, HTL หรือแปลงเป็น sine/cosine wave เพื่อประมวลผลในระบบอนาล็อกหรือดิจิทัลได้

การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

การอ่านค่า Incremental Encoder จำเป็นต้องแปลง Pulse Count ให้เป็นตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) และสามารถคำนวณ **Angular Velocity** ได้จากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งต่อเวลา เทคนิคสำคัญที่ใช้ ได้แก่:

- **Position Wrap Around / Unwrapping Technique:** เมื่อค่า Pulse นับเกินรอบหนึ่ง (overflow) ต้องใช้เทคนิค unwrapping เพื่อให้ได้ตำแหน่งต่อเนื่อง
- **QEI (Quadrature Encoder Interface):** ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือ FPGA อ่านสัญญาณ A/B/X4 เพื่อให้ได้ตำแหน่งและทิศทางแบบเรียลไทม์
- **Polling Method:** วัดสัญญาณเป็นระยะ ๆ เพื่อคำนวณตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดความหน่วง (latency) และค่าผิดพลาดได้
- **การคำนวณ Angular Velocity:** ใช้

$$\frac{\Delta Position}{\Delta Time}$$

จาก Pulse Count เพื่อประเมินความเร็วหมุนของเพลลา

- **ข้อควรระวัง:** หากสัญญาณสัญญาณสูญหายหรือ noise ในสาย Encoder อาจทำให้ตำแหน่งอ่านผิดพลาด จำเป็นต้องใช้ debounce หรือ filter

ในการทดลองนี้ ใช้ encoder 2 ประเภท คือ

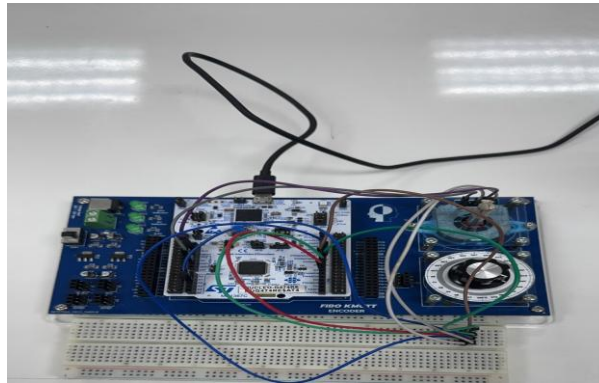
AMT103-V เป็น Modular Encoder แบบ Capacitive ที่สามารถปรับความละเอียดได้สูงสุดถึง 2048 PPR โดยผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าได้ผ่าน DIP switch รองรับสัญญาณเอาต์พุตแบบ TTL square wave และมีฟังก์ชัน Index Pulse (Z) สำหรับอ้างอิงตำแหน่ง Encoder ตัวนี้รองรับความเร็วหมุนสูงสุดถึง 30,000 RPM และสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 3.6–5.5 V DC และอุณหภูมิ -40°C ถึง +100°C การออกแบบแบบ Modular ทำให้ปรับแต่งการใช้งานได้ง่าย เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความละเอียดสูงและความเร็วในการหมุนสูง

PEC11R-4220F-N0024 เป็น Mechanical Encoder ขนาด 12 มม. ที่มีสัญญาณเอาต์พุตแบบ Quadrature (2-bit) และมาพร้อมสวิตช์ Push-On Momentary SPST ในตัว รองรับความเร็วหมุนสูงสุด 60 RPM และแรงดันไฟฟ้า 5V DC ช่วงอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ -30°C ถึง +70°C ตัว Encoder มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงถึง 100G และอายุการใช้งานทางกลสูงถึง 30,000 รอบ เหมาะสำหรับงานที่มีพื้นที่จำกัดและต้องการความทนทาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- เตรียมอุปกรณ์ ดังนี้
 - 1.1. Incremental Encoder AMT103-V
 - 1.2. BOURNS PEC11R-4220F-N0024
 - 1.3. NUCLEO STM32G474RE
 - 1.4. สายจัมเปอร์
 - 1.5. EncoderXplorer – ฐานบอร์ดควบคุม อุปกรณ์ต่าง ๆ และ 3D-Printed Part สำหรับการวัดมุม
 - 1.6. การหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไม้โปรแทรกเตอร์
- เตรียมวงจรเชื่อมต่อ Incremental Encoder เข้ากับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE ทำการต่อสายดังนี้:

Vcc ของ Incremental Encoder → 3V3	ขาสัญญาณ A ของ Incremental Encoder
บน STM32	→ PA6, PC0, PC6, PA8
GND ของ Incremental Encoder → GND	ขาสัญญาณ B ของ Incremental Encoder
บน STM32	→ PA7, PC1, PC7, PB10



รูปที่ 8 แสดงการต่อสายของ Incremental Encoder

จากนั้นตั้งค่า STM32CubeMX โดยกำหนด Timer (TIM1, TIM3, TIM8) เป็น Encoder Mode ตามโหมดที่เหมาะสม:

TIM3 → Encoder Mode 1XTI1

TIM8 → Encoder Mode TI1 and TI2

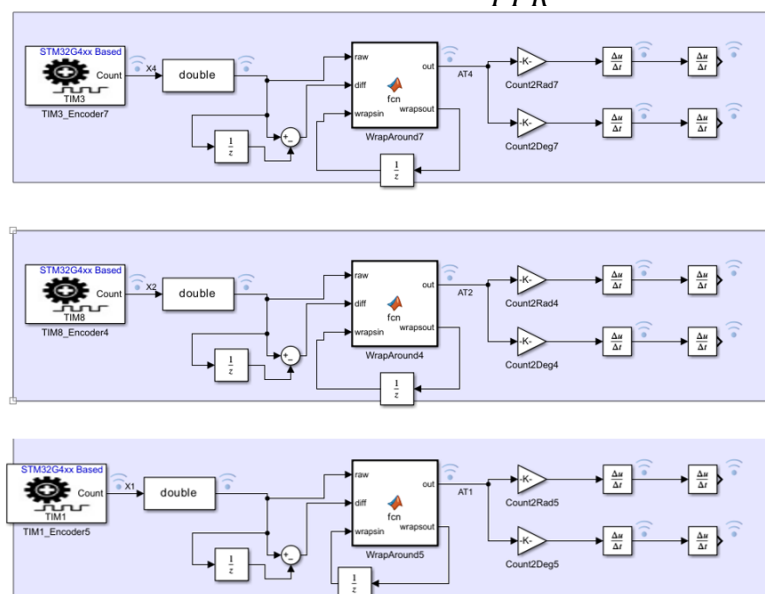
TIM1 → Encoder Mode TI1

กำหนดค่า counter period ตามชนิด Encoder ที่ใช้เป็น 61439

3. ตั้งค่า Simulink สำหรับการอ่านค่า QEI

- QEI Mode:
- นำข้อมูลจาก Encoder เข้าสู่ Simulink ผ่าน QEI Block
- แปลง data type เป็น double และนำเข้าสู่ MATLAB Function ผ่านพารามิเตอร์ encoder_signal
- ใช้ wrap-around เพื่อจัดการค่าเมื่อถึงขอบสูงสุดหรือต่ำสุด
- คำนวณตำแหน่ง (radian) และความเร็วเชิงมุม (rad/0.1s) โดย

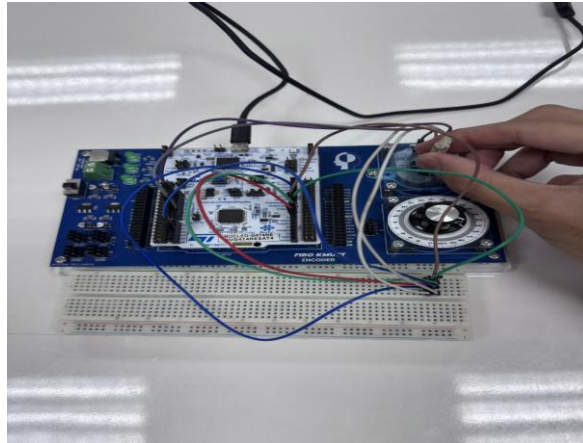
$$Gain = \frac{2\pi}{PPR}$$



รูปที่ 9 Simulink Code Block For Encoders

4. หมุนเพลาหรือเปลี่ยนทิศทางของ Encoder

- หมุนเพลาตามเข็มและทวนเข็ม
- ทำการเก็บข้อมูลสำหรับโหมด X1, X2, X4 QEI
- กดปุ่มหรือใช้บล็อก Digital Port Read เพื่อเริ่มบันทึกข้อมูลในแต่ละตำแหน่งเก็บค่า Pulse จำนวน 1,000 ค่า



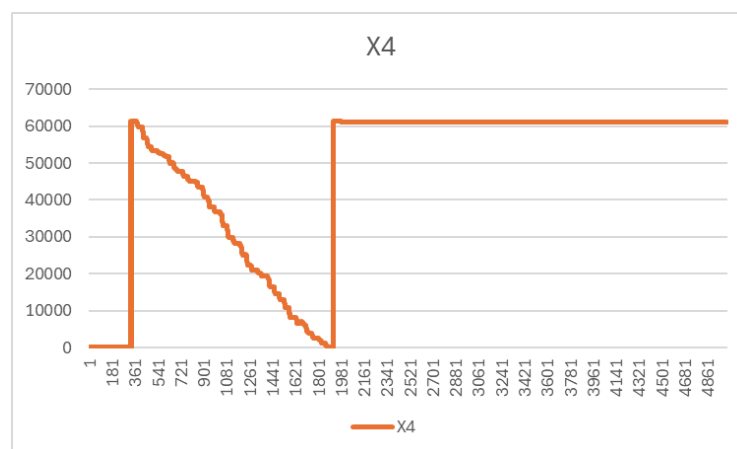
รูปที่ 10 การหมุนเพลาของ Encoder และการกดปุ่มเพื่อเก็บข้อมูล

5. ส่งออกและบันทึกข้อมูล

- ใช้ Data Inspector หรือ To Workspace Block ใน Simulink
- บันทึกค่าที่ได้จากแต่ละโหมดและแต่ละทิศทางของการหมุน
- เก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการ Plot กราฟและวิเคราะห์

6. คำนวณค่าเฉลี่ยและแปลงหน่วย

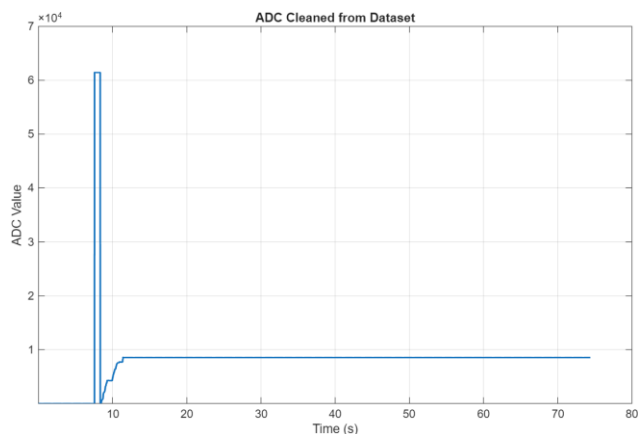
- นำข้อมูลจำนวน 1,000 ค่าในแต่ละตำแหน่งมาคำนวณ Mean
- แปลงเป็นตำแหน่งเชิงมุม (radian) และความเร็วเชิงมุม (rad/0.1s)
- ใช้ MATLAB Function สำหรับการ warp-around และคำนวณเดลต้า (Delta)



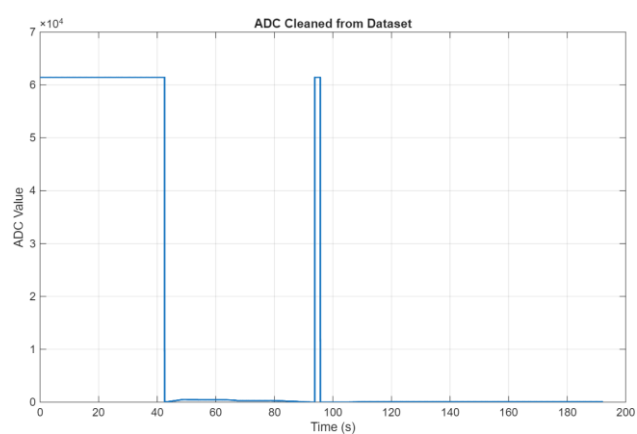
กราฟที่ 11 การพลอตค่าที่ได้จากหมุนเพลา

ผลการทดลอง

1. การวัดและคำนวณ PPR



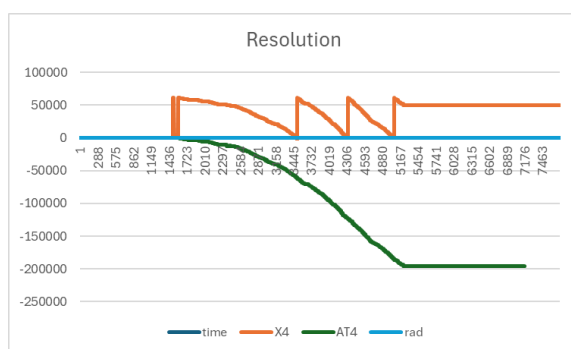
กราฟที่ 12 การหาค่า PPR ของ AMT



กราฟที่ 13 การหาค่า PPR ของ PEC11R

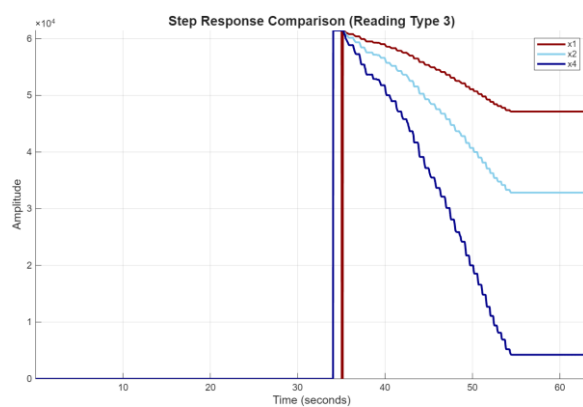
2. การคำนวณและแสดงผล Angular Resolution

ได้มีการนำค่า PPR ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตำแหน่งจากพัลส์ได้โดยนำค่าที่ได้จากการคำนวณไป คูณกับค่าที่ออกจาก wraparound function



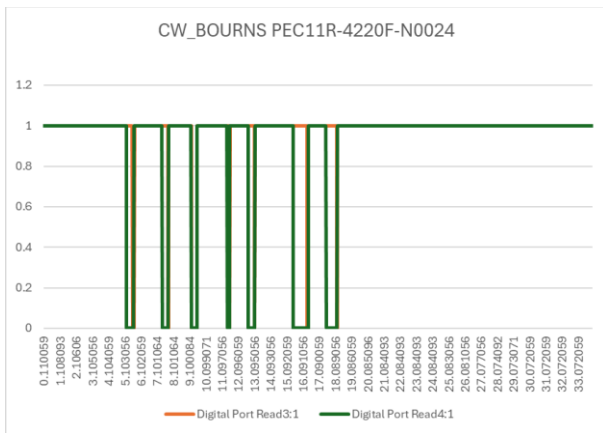
กราฟที่ 14 การหาค่า Angular position

3. การอ่านค่าแบบต่างๆ

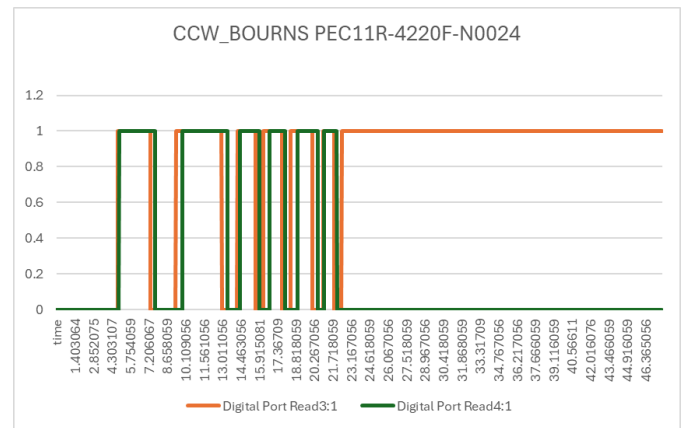


กราฟที่ 15 การอ่านค่าแบบต่างๆ

4. Phase Relationship A กับ B และ ทิศทางการหมุน

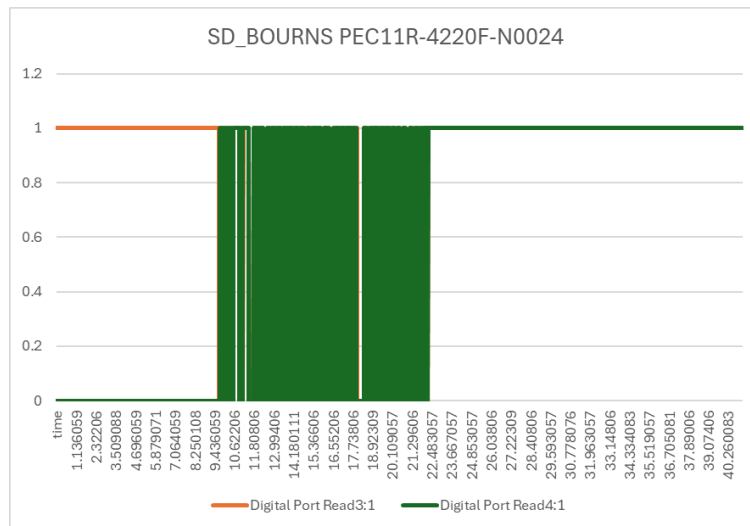


กราฟที่ 16 CW Relations



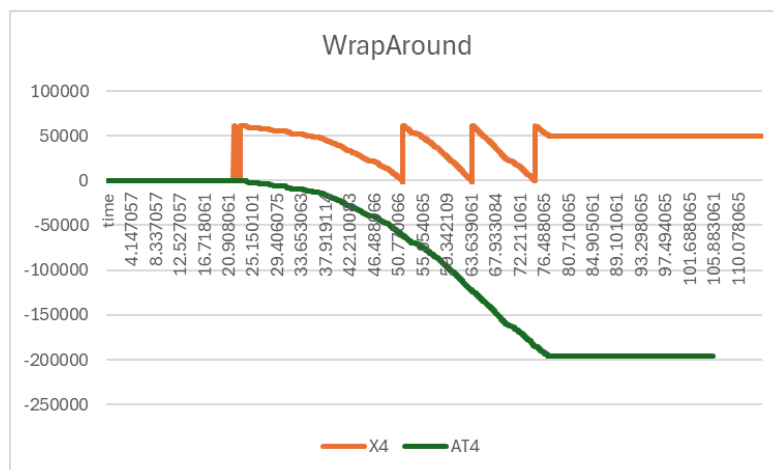
กราฟที่ 17 CCW Relations

5. ความเร็วการหมุนต่อคุณภาพสัญญาณ



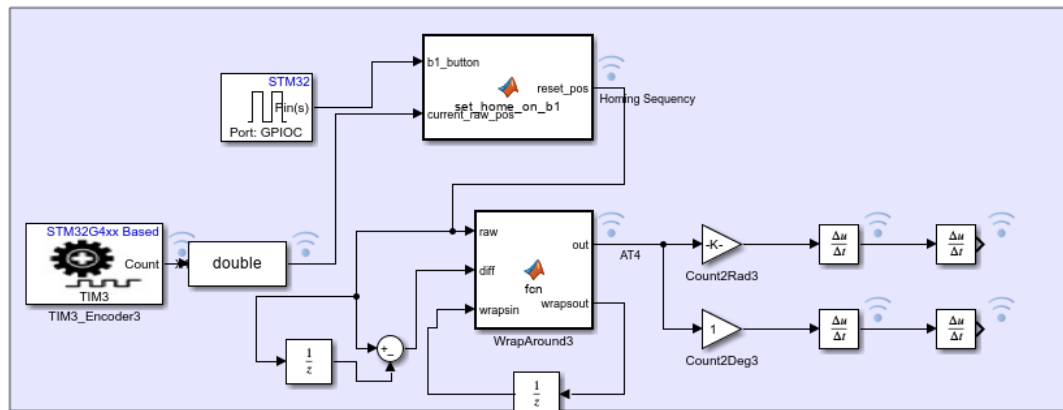
กราฟที่ 18 สัญญาณที่มีความถี่สูง

6. การทำ WrapAround



กราฟที่ 19 การเปรียบเทียบ wrap around

7. การทำ Homing Sequence



รูปที่ 11 Homing Sequence QEI

สรุปผลการทดลอง

1. การคำนวณค่า PPR (Pulses Per Revolution)

เมื่อทำการหมุน Encoder ครบหนึ่งรอบ (360 องศา) และอ่านค่าด้วยโหมด X4 ให้นำค่าจำนวนพัลส์ที่อ่านได้หารด้วย 4 เพื่อหาค่า PPR ที่แท้จริง ของ Encoder นั้น

จากการทดลอง:

- BOURNS PEC11R-4220F-N0024 อ่านได้ 96 พัลส์ $\rightarrow 96 \div 4 = 24$ PPR
- AMT Encoder อ่านได้ค่าเทียบเท่า \rightarrow PPR = 2048

2. การคำนวณค่า Angular Resolution Angular Resolution

ค่าความละเอียดเชิงมุม (Angular Resolution) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Resolution} = \frac{360}{PPR} = \frac{2\pi}{PPR}$$

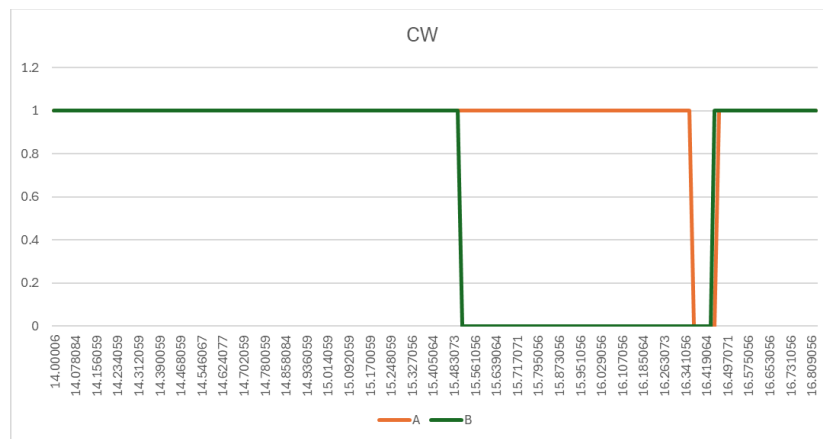
ค่าที่ได้สามารถใช้คำนวณ ตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) ได้ โดยนำผลลัพธ์จากสมการไป คูณกับจำนวนพัลส์ที่ Encoder วัดได้จริง

3. การอ่านค่าด้วยโหมดต่าง ๆ ของ Encoder

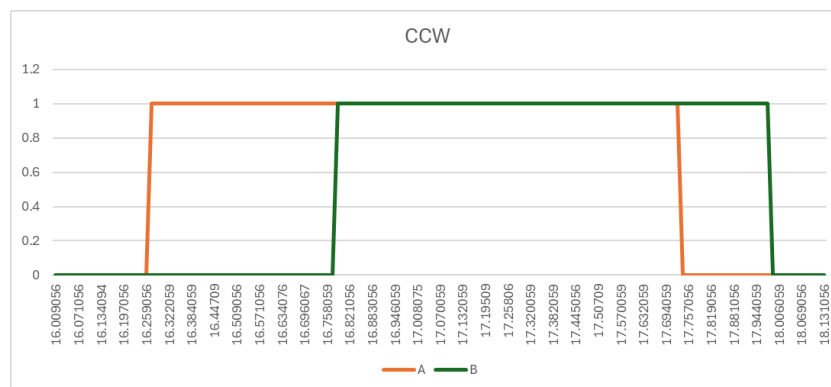
การอ่านสัญญาณ Encoder มีได้หลายรูปแบบ ได้แก่

- X1 Mode: อ่านเฉพาะขอบขาขึ้น (rising edge) ของสัญญาณช่อง A \rightarrow ความละเอียดต่ำ
- X2 Mode: อ่านทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณช่อง A \rightarrow ความละเอียดมากขึ้น
- X4 Mode: อ่านทั้งขอบขาขึ้นและขาลงของสัญญาณทั้งช่อง A และ B \rightarrow ได้ความละเอียดสูงสุด

4. Phase Relationship และการหมุน

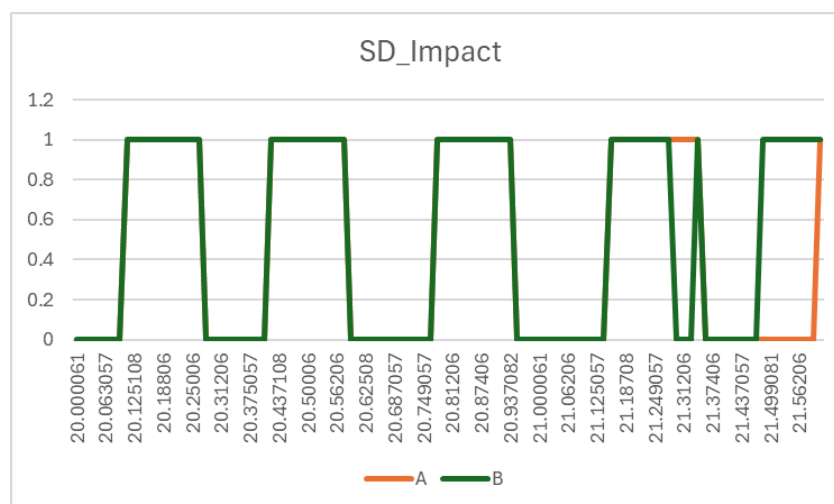


กราฟที่ 20 หมุนตามเข็มนาฬิกา สัญญาณ B นำสัญญาณ A 90 องศา



กราฟที่ 21 หมุนทวนเข็มนาฬิกา สัญญาณ A นำสัญญาณ B อยู่ 90 องศา

5. ความเร็วการหมุนต่อคุณภาพสัญญาณ



กราฟที่ 22 สัญญาณที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากความถี่สูงเกินไป

เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงเกินความถี่ที่ตัวอ่านสามารถอ่านได้ ทำให้ค่าที่ได้มีความไม่ถูกต้อง

6. การทำ wrap around เป็นการนำค่าสูงสุดที่อ่านได้ก่อนเกิดการรีเซ็ตเก็บไว้เป็นรอบๆ แล้วนำค่าสูงสุด ไปคูณรอบแล้วบวกสัญญาณที่อ่านได้หลังรีเซ็ต ทำให้ได้ค่าที่ต่อเนื่อง

7. การทำ Homing Sequence นำสวิตช์มาเป็น input สำหรับการสั่งทำงาน homing โดยหากกดปุ่มแล้วให้เริ่มนับตำแหน่งที่หมุนไป

อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า Encoder ทั้งสองรุ่นมีค่า PPR (Pulses Per Revolution) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย AMT Encoder มีค่า PPR = 2048 ขณะที่ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีค่า PPR = 24 ซึ่งหมายความว่า AMT Encoder สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของมุมหมุนได้ละเอียดกว่า BOURNS Encoder หลายเท่า

อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพบว่า เมื่อความเร็วในการหมุนเพลลาของ Encoder เพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองช่อง A และ B จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากความถี่ของสัญญาณสูงเกินขีดความสามารถในการอ่านค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU Reading Frequency Limit) จะส่งผลให้ ข้อมูลที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาด เนื่องจาก MCU ไม่สามารถตรวจจับขอบสัญญาณทั้งหมดได้ทันเวลา

ดังนั้น แม้ Encoder ที่มีค่า PPR สูงจะให้ความละเอียดในการวัดมุมหมุนที่แม่นยำกว่า แต่การเลือกใช้งานต้องคำนึงถึง ความสามารถในการประมวลผลของ MCU และความถี่สูงสุดที่สามารถอ่านได้อย่างเสถียร เพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือที่สุด

ข้อเสนอแนะ

การหมุนเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณควรหมุนด้วยความเร็วคงที่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สัญญาณ

อ้างอิง

- <https://assunmotor.com/blog/incremental-encoder/>
- <https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/>
- <http://ni.com/docs/en-US/bundle/crio-905x-getting-started/page/meas-quad-encoder.html>
- <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PEC11R.pdf>
- https://www.cncdrive.com/downloads/AMT103_datasheet.pdf

การทดลองที่ 3 Magnetic Sensor

จุดประสงค์

1. เพื่อสามารถอธิบายลักษณะสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor (DRV5055) ได้ เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) เปลี่ยนแปลงไป และสามารถเปรียบเทียบการตอบสนองต่อขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ได้อย่างถูกต้อง
2. เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการใช้แผ่น Magnetic Field Shielding กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ที่ Sensor ตรวจจับได้ รวมถึงเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีตามข้อมูลใน Datasheet

สมมติฐาน

เมื่อใช้ขั้วแม่เหล็กต่างกัน (N และ S) ค่าแรงดันที่ขา OUT ของ DRV5055 จะเปลี่ยนไปในทิศทางตรงข้าม โดยขั้วใต้ (South Pole) จะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง ($V_{CC}/2$) ส่วนขั้วเหนือ (North Pole) จะทำให้แรงดันลดลง และเมื่อใช้ Shield จะทำให้ค่าการตอบสนองของสนามแม่เหล็กลดลงตามสัดส่วนเนื่องจากการบังสนามแม่เหล็กบางส่วน

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ขั้วแม่เหล็กที่นำมาเข้าใกล้เซนเซอร์ (North / South Pole)
 - การมีหรือไม่มีการติดตั้งแผ่น Shield ในตำแหน่งของเซนเซอร์
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าแรงดันไฟฟ้า Output (V_{out}) ของเซนเซอร์
 - ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density (B)) ที่ส่งผลต่อเซนเซอร์
3. ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซนเซอร์ ($V_{CC} = 5V$)
 - บอร์ดประมวลผลที่ใช้ในการอ่านค่า (NUCLE STM32G474RE)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Magnetic Sensor

Magnetic Sensor เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรหรือกระแสไฟฟ้า และแปลงสัญญาณสนามแม่เหล็กเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถวัดและนำไปประมวลผลได้ หนึ่งในหลักการพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ Hall Effect ซึ่งค้นพบโดย Edwin Hall ในปี 1879 หลักการ Hall Effect เกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านแผ่นตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์บาง ๆ เช่น ซิลิคอน, GaAs หรือ InSb และมีสนามแม่เหล็ก (B) ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส อิเล็กตรอนจะได้รับแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ส่งผลให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับทั้งกระแสและสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิด Hall Voltage (V_H) ข้ามแผ่น

สูตรของ Hall Voltage คือ:

$$V_H = \frac{R_H \times I \times B}{t}$$

โดยที่ R_H เป็นค่าคงที่ของ Hall Effect ขึ้นกับวัสดุ, I คือกระแสไฟฟ้า, B คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก, และ t คือความหนาของแผ่นเซมิคอนดักเตอร์

คุณสมบัติสำคัญคือ Hall Voltage มีสัดส่วนตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถใช้วัด B ได้โดยตรง ทิศทางของ V_H ขึ้นกับทิศของสนามแม่เหล็ก และสามารถทำงานกับสนามแม่เหล็กนิ่ง (static field) Hall Sensor รุ่นใหม่มีกรวมวงจรขยายสัญญาณ, regulator, และ compensation circuit สำหรับอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความไวและความเสถียร สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้ถึงระดับมิลลิเทสลา

2. คุณสมบัติทางแม่เหล็ก

Magnetic Response หมายถึง การตอบสนองของวัสดุหรือเซ็นเซอร์เมื่อสัมผัสกับสนามแม่เหล็ก การตอบสนองนี้สามารถวัดได้ในแง่ของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตไฟฟ้า หรือพฤติกรรมของระบบภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

Magnetic Flux Direction (ทิศทางของสนามแม่เหล็ก)

สนามแม่เหล็กเป็นเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาดและทิศทาง เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Lines) จะออกจากขั้วเหนือ (N) และเข้าสู่ขั้วใต้ (S) วนกลับภายในแม่เหล็กเป็นวงปิดไม่ตัดกัน ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน ขั้วต่างกันจะดึงดูดกัน กฎมือขวา (Right-Hand Rule) ใช้กำหนดทิศทางของสนามรอบตัวนำหรือโซลินอยด์

Magnetic Flux Density (ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก)

ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น Tesla (T) หรือ $\frac{Wb}{m^2}$ โดยคำนวณจากฟลักซ์แม่เหล็ก Φ ต่อพื้นที่ A

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

B ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแหล่งกำเนิด, กระแสไฟฟ้า, และวัสดุในสนาม สำหรับวัสดุแม่เหล็ก

$$B = \mu_o (= \mu_r H + M)$$

วัสดุที่มี permeability สูง เช่น Permalloy ถูกใช้ในเซ็นเซอร์ MR เพื่อเพิ่มความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ B

Magnetic Field Shielding (การป้องกันหรือเบี่ยงเบนสนามแม่เหล็ก)

การป้องกันสนามแม่เหล็ก (Shielding) ใช้ลดการรบกวนจากสนามภายนอก หรือป้องกันไม่ให้สนามรั่วไหลไปยังอุปกรณ์อื่น หลักการคือสนามแม่เหล็กจะเลือกเดินทางผ่านวัสดุที่มี μ สูง เช่น Mu-metal หรือ Permalloy แทนที่จะผ่านพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน เทคนิคการออกแบบเช่นวางเซ็นเซอร์ตั้งฉากกับตัวนำ, ใช้โล่สองชั้น, หรือใช้ surface-mount magnetic shield สามารถลดการรบกวนได้เกือบ 100%

3. คุณสมบัติของ Sensor

ลักษณะสัญญาณ Output ของ Magnetic Sensor สามารถส่งออกสัญญาณได้สองรูปแบบหลักคือ

3.1. Analog Output (Linear Response)

แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตรงตามความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) โดยกราฟเป็นเส้นตรงในช่วงทำงาน ทำให้สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้แม่นยำ มี saturation เมื่อ B สูงเกินกำลังของวงจร ตัวอย่างเช่น Hall Sensor แบบ analog และ MR Sensor (AMR/GMR/TMR)

3.2. Digital Output (On/Off Response)

ใช้ Schmitt Trigger และ hysteresis เพื่อป้องกันการสั่นของสัญญาณเมื่อ B ใกล้ threshold มีสองสถานะ คือ ON ($B > \text{threshold}$) และ OFF ($B < \text{release point}$) ตัวอย่างเช่น Unipolar Switch (ทำงานกับขั้วเดียว) และ Bipolar Switch (ทำงานกับทั้งขั้วเหนือและใต้)

4. Sensitivity และ Linearity ของ Magnetic Sensor

Sensitivity (ความไว) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลง 1 หน่วยของ B หน่วย V/T หรือ mV/G โดย TMR มีความไวสูงที่สุด เหมาะกับงานตรวจจับสนามแม่เหล็กอ่อนมาก

Linearity (ความเป็นเส้นตรง) คือความแม่นยำที่เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตาม B อย่างสม่ำเสมอ Hall Sensor มักมี linearity error $\leq \pm 0.25\%$ ในช่วง 10–90% ของ VDD ส่วน MR Sensor ต้องใช้ calibration หรือ feedback loop เพื่อแก้ non-linearity เทคนิคเสริม เช่น calibration, temperature compensation, หรือ lock-in amplifier ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลด noise

5. คำนวณหาMagnetic Response

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

V_Q คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของ Vcc

B คือ ค่า Magnetic Flux Density

$Sensitivity_{(25^\circ C)}$ คือ ค่าที่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และ Vcc

S_{TC} คือ typically 0.12%/°C for device options DRV5055A2

T_A คือ อุณหภูมิ ณ ปัจจุบัน

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก

ขั้นตอนการดำเนินงาน

8. เตรียมอุปกรณ์

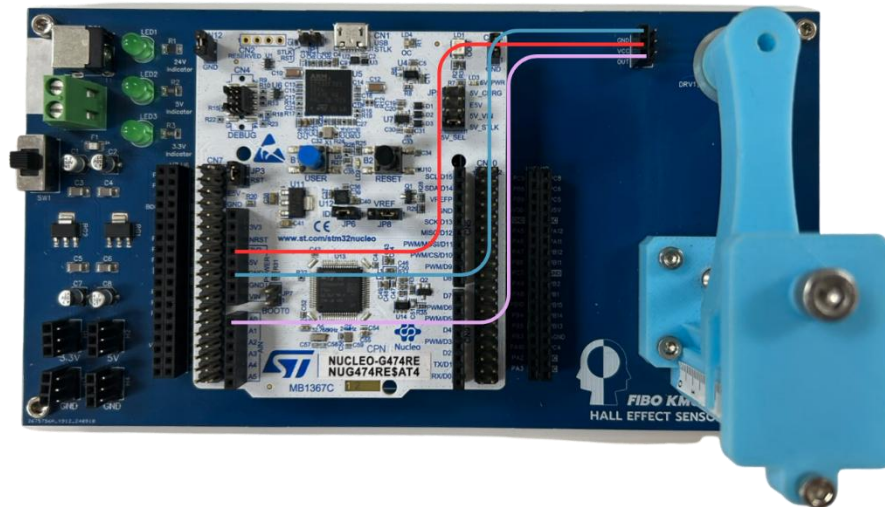
1.1. DRV5055A2 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

1.2. NUCLE STM32G474RE

1.3. MagneticXplorer – ฐานบรรจุบอร์ดควบคุม อุปกรณ์ต่าง ๆ และ 3D-Printed Part สำหรับการปรับระยะแม่เหล็กถาวรกับ Sensor

1.4. สายจัมเปอร์ 3 สาย

9. เชื่อม Pin ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic กับ NUCLEO STM32G474RE

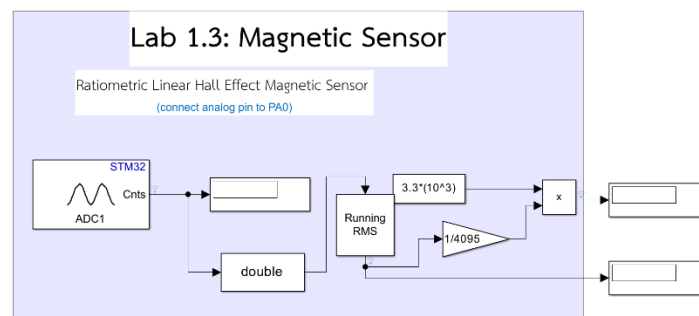


รูปที่ 12 แสดงการต่อสายจัมเปอร์เข้ากับ NUCLEO STM32G474RE

Vcc ของ Incremental encoder เชื่อมกับ Vcc บน STM32 GND ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic เข้า GND ของ STM32 และ OUT ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic เข้า PA0 เพื่อเตรียมระบบสำหรับอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์

10. การนำค่าจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ออกมา

3.1. การแปลงค่าสัญญาณที่อ่านได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 13 แสดงวงจรการแปลงค่าสัญญาณที่อ่านได้ให้เป็นแรงดันทางไฟฟ้า

- 3.1.1. รับค่าสัญญาณจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เข้าสู่บอร์ด NUCLEO STM32G474RE และใช้บล็อก “ Analog to Digital Converter (ADC)” สำหรับการแปลง สัญญาณ Analog ให้เป็น สัญญาณ Digital
- 3.1.2. ทำการแปลงสัญญาณ Digital เป็น double ผ่านบล็อก “Data Type Conversion”
- 3.1.3. ทำการตัดขวางความถี่ที่ไม่ต้องการออกด้วยการใช้บล็อก “Running RMS”
- 3.1.4. บอร์ด NUCLEO STM32G474RE รับค่าสัญญาณได้ 12-bit (จาก $2^{12} = 4096$) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 - 4095 จึงต้องทำการใช้บล็อก “Gain” ที่มีค่า 4095 หาร เพื่อให้ค่าสัญญาณของเราอยู่ในช่วง 0 – 1 โดยเป็นค่าผลลัพธ์สัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากสัญญาณ Analog

3.1.5. เมื่อเราได้ค่าสัญญาณที่อยู่ในช่วง 0 – 1 ที่เป็นผลลัพธ์สัดส่วน ต่อมาเราจึงใช้บล็อก “Product” คูณระหว่างค่าสัญญาณกับบล็อก “Constant” ที่มีค่า 3.3 เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้ อยู่ในสัดส่วน 0 – 3.3 ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของระยะการเลื่อนขึ้นลง

11. นำแม่เหล็กขั้ว “ใต้” เข้าใกล้เซนเซอร์ที่ละตำแหน่งโดยเพิ่มระยะทุก 5 mm
 - 4.1. ตำแหน่งแรกและสุดท้ายจะบวก 4 mm
 - 4.2. เก็บข้อมูลทั้งหมด 8 ตำแหน่ง จะได้ระยะทาง [11,15,20,25,30,35,40,44] mm
 - 4.3. ในแต่ละตำแหน่ง ทำการบันทึกสัญญาณจำนวน 2,000 ค่า แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยผ่าน Running RMS
 - 4.4. ค่าที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในแนวแกนเซนเซอร์
12. ติดตั้งแผ่น Shield บริเวณแผ่นแม่เหล็ก และทำการทดลองซ้ำในทิศขั้วใต้
 - 5.1 ตำแหน่งแรกและสุดท้ายจะบวก 4 mm
 - 5.2 คงตำแหน่งการวัดทุก 5 mm จำนวน 8 ครั้ง จะได้ระยะทาง [11,15,20,25,30,35,40,44] mm
 - 5.3 เก็บข้อมูล 2,000 ค่าในแต่ละตำแหน่งเช่นเดิมดังข้อ 4.2
 - 5.4 จุดประสงค์คือเพื่อศึกษาผลของการ Shield ต่อ Flux Density แม่เหล็กที่เซนเซอร์ตรวจจับได้
13. ทำการสลับขั้วแม่เหล็กแล้ววนกลับไปทำข้อ 4 เป็นต้นมา
14. นำข้อมูลที่ได้มา plot กราฟ ระหว่างระยะห่างของตำแหน่งกับค่าสัญญาณที่ได้ ด้วยโปรแกรม Excel

ผลการทดลอง

1. Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบไม่มี Shield

ตารางที่ 3 แสดงค่าที่ได้จากการรับสัญญาณแม่เหล็กทิศเหนือของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบไม่มี Shield

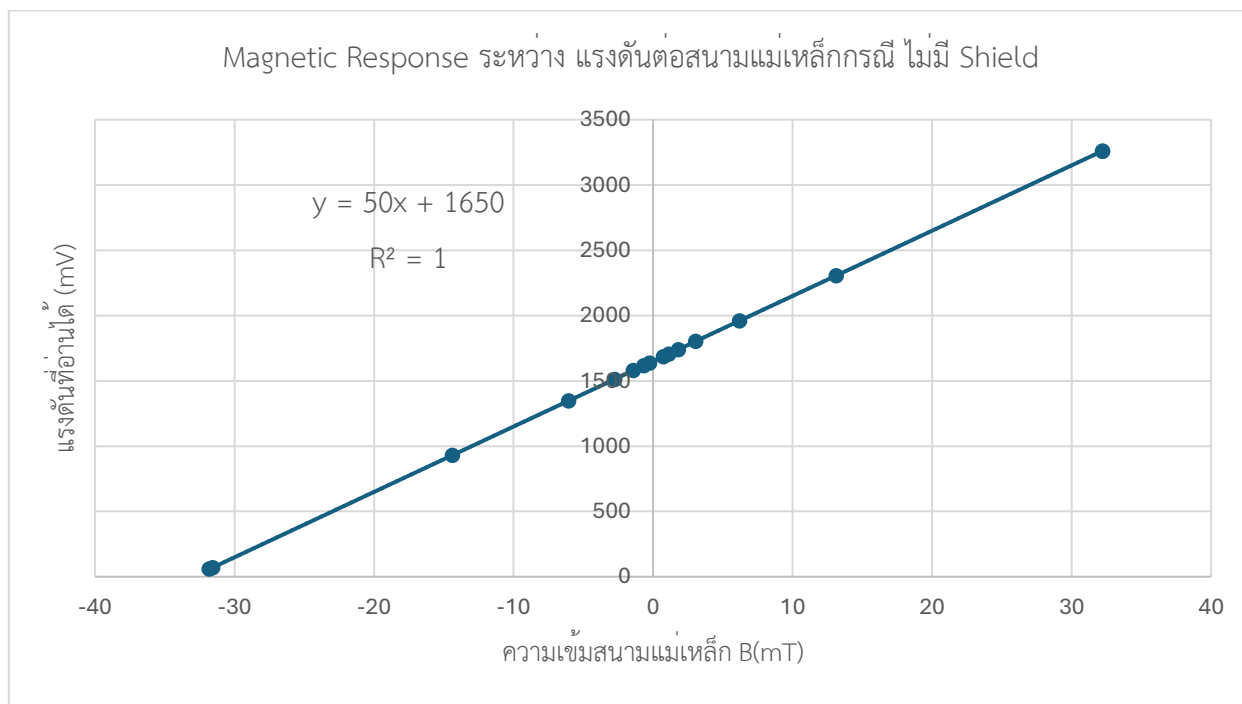
ความสูง (mm)	Bit ที่อ่าน ได้	แรงดันที่ อ่านได้ (mV)	B(mT)
44	2032	1637	-0.26
40	2006	1616	-0.68
35	1960	1579	-1.42
30	1875	1512	-2.76
25	1671	1347	-6.06
20	1155	930.9	-14.382
15	88.08	70.94	-31.5812
11	72.95	58.78	-31.8244

ตารางที่ 4 แสดงค่าที่ได้จากการรับสัญญาณแม่เหล็กทิศใต้ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบไม่มี Shield

ความสูง (mm)	Bit ที่อ่าน ได้	แรงดันที่ อ่านได้ (mV)	B(mT)
44	2092	1686	0.72
40	2117	1706	1.12
35	2159	1740	1.8
30	2236	1802	3.04
25	2431	1959	6.18
20	2862	2306	13.12
15	4045	3260	32.2
11	4045	3260	32.2

ตารางที่ 5 แสดงค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้า

แม่เหล็กไม่มี Shield และ สลับขั้วแม่เหล็กไม่มี Shield				
ทิศ	ความสูง (cm)	Bit ที่อ่านได้	B(mT)	แรงดันที่อ่านได้ (mV)
ขั้วใต้	11	4045	32.2	3260
	15	4045	32.2	3260
	20	2862	13.12	2306
	25	2431	6.18	1959
	30	2236	3.04	1802
	35	2159	1.8	1740
	40	2117	1.12	1706
	44	2092	0.72	1686
ขั้วเหนือ	44	2032	-0.26	1637
	40	2006	-0.68	1616
	35	1960	-1.42	1579
	30	1875	-2.76	1512
	25	1671	-6.06	1347
	20	1155	-14.382	930.9
	15	88.08	-31.5812	70.94
	11	72.95	-31.8244	58.78



กราฟที่ 23 Magnetic Response ระหว่าง แรงดันต่อสนามแม่เหล็กกรณีไม่มี Shield

2. Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบใส่ Shield

ตารางที่ 6 แสดงค่าที่ได้จากการรับสัญญาณแม่เหล็กทิศเหนือ
ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบใส่

Shield

ความสูง (cm)	Bit ที่อ่าน ได้	แรงดันที่ อ่านได้ (mV)	B(mT)
44	2088	1683	0.66
40	2108	1699	0.98
35	2146	1730	1.6
30	2225	1793	2.86
25	2396	1931	5.62
20	2785	2245	11.9
15	4041	3257	32.14
11	4045	3260	32.2

ตารางที่ 7 แสดงค่าที่ได้จากการรับสัญญาณแม่เหล็กทิศใต้
Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic แบบใส่

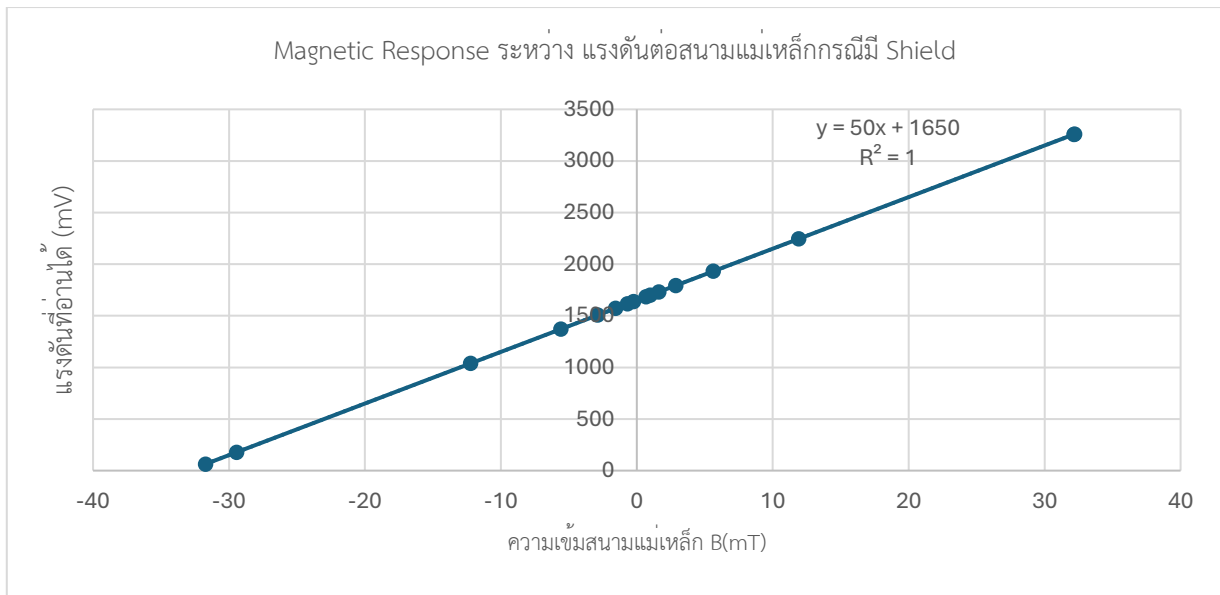
Shield

ความสูง (cm)	Bit ที่อ่าน ได้	แรงดันที่ อ่านได้ (mV)	B(mT)
44	2033	1638	-0.24
40	2005	1615	-0.7
35	1966	1572	-1.56
30	1882	1506	-2.88
25	1702	1370	-5.6
20	1288	1038	-12.24
15	220.2	177.5	-29.45
11	77.9374	62.81	-31.74

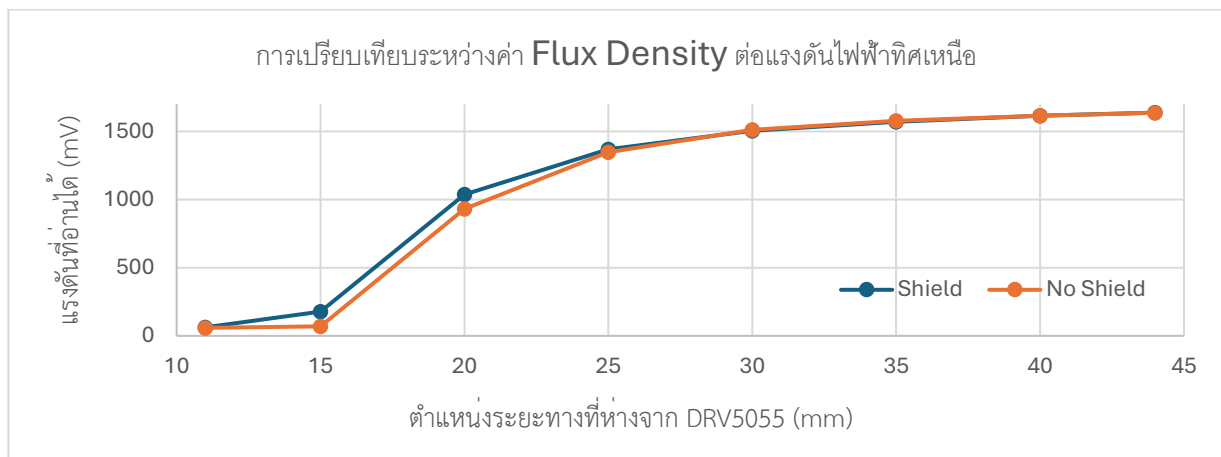
ตารางที่ 8 แสดงค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้า แสดงค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้า

แม่เหล็กไม่มี Shield และ สลับขั้วแม่เหล็กมี Shield

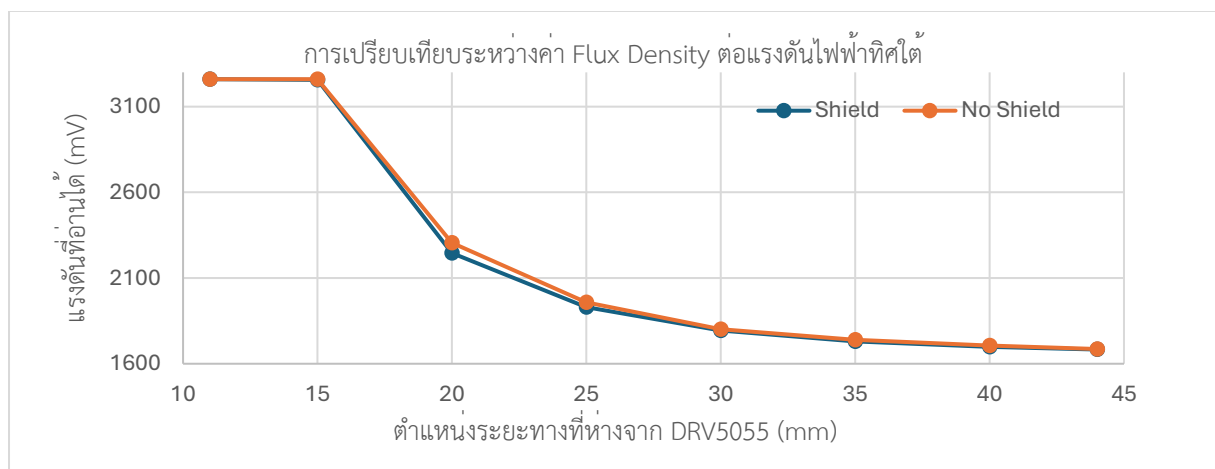
ทิศ	ความสูง (cm)	Bit ที่อ่านได้	B(mT)	แรงดันที่อ่านได้ (mV)
ขั้วใต้	11	4045	32.2	3260
	15	4041	32.14	3257
	20	2785	11.9	2245
	25	2396	5.62	1931
	30	2225	2.86	1793
	35	2156	1.6	1730
	40	2108	0.98	1699
	44	2088	0.66	1683
ขั้วเหนือ	44	2033	-0.24	1638
	40	2005	-0.7	1615
	35	1966	-1.56	1572
	30	1882	-2.88	1506
	25	1702	-5.6	1370
	20	1288	-12.24	1038
	15	220.2	-29.45	177.5
	11	77.9374	-31.7438	62.81



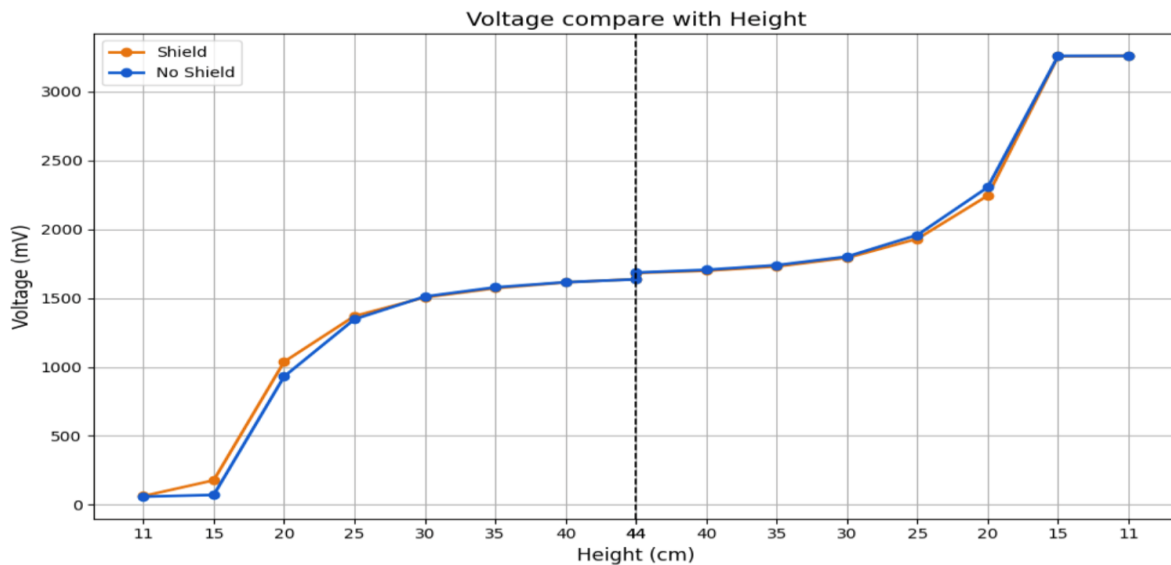
กราฟที่ 24 Magnetic Response ระหว่าง แรงดันต่อสนามแม่เหล็กกรณีมี Shield



กราฟที่ 25 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้าที่คั่นเหนือกรณีมี Shield และ ไม่มี Shield



กราฟที่ 26 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้าที่คั่นใต้กรณีมี Shield และ ไม่มี Shield



กราฟที่ 27 การเปรียบเทียบระหว่างค่า Flux Density ต่อแรงดันไฟฟ้าที่คเทเหนื่อและใต้ กรณมี Shield และ ไม่มี Shield

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กแบบ Ratiometric Linear Hall Effect มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางในลักษณะกราฟแบบ ซิกมอยด์ (Sigmoid Curve) กล่าวคือ เมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับเซนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แรงดันไฟฟ้าที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงของ ขั้วแม่เหล็กเหนือ (0 ถึงครึ่งหนึ่งของแรงดันสูงสุด) และช่วงของ ขั้วแม่เหล็กใต้ (ครึ่งหนึ่งถึงแรงดันสูงสุด) โดยแรงดันไฟฟ้าจะมีค่ากลางในบริเวณที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ จากการเปรียบเทียบระหว่างเซนเซอร์ที่มีการป้องกันสนามแม่เหล็ก (Shield) และเซนเซอร์ที่ไม่มีการป้องกัน พบว่า เซนเซอร์ที่มีการป้องกันให้ค่าการตอบสนองที่มีความต่อเนื่องและเสถียรมากกว่า เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่ไม่มี Shield ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานของการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) มีความสัมพันธ์ แปรผันตรงแบบเชิงเส้น (Linear Relationship) กับแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กก็เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งผลลัพธ์นี้ยืนยันความถูกต้องของสมมุติฐานในการทดลอง

อภิปรายผล

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์ Ratiometric Linear Hall Effect มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางในลักษณะกราฟแบบ ซิกมอยด์ (Sigmoid Curve) กล่าวคือ เมื่อระยะทางระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์เพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเพิ่มขึ้นตาม โดยกราฟแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของ ขั้วแม่เหล็กเหนือ (จาก 0 ถึงครึ่งหนึ่งของแรงดันสูงสุด) และส่วนของ ขั้วแม่เหล็กใต้ (จากครึ่งหนึ่งถึงแรงดันสูงสุด) ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันทางไฟฟ้า (Voltage) กับ ระยะห่างของตำแหน่ง (Height) พบว่า เมื่อระยะห่างของตำแหน่งเพิ่มขึ้น (แม่เหล็กอยู่ไกลจากเซนเซอร์มากขึ้น) ค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่อ่านได้จะ เข้าใกล้ค่ากลาง ซึ่งเป็นแรงดันสมดุลของเซนเซอร์ในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ ในทางกลับกัน เมื่อ

ระยะห่างลดลง (แม่เหล็กเข้าใกล้เซนเซอร์) ค่าแรงดันจะ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดในทิศหัวเหนือและหัวใต้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ มี Shield (แผ่นป้องกันสนามแม่เหล็ก) และ ไม่มี Shield พบว่าแรงดันที่วัดได้ในกรณีมี Shield จะมีค่าสูงกว่า ซึ่งอธิบายได้ว่า Shield ทำหน้าที่ จำกัดเส้นทางการกระจายของสนามแม่เหล็ก และ โฟกัสสนามแม่เหล็กมายังบริเวณเซนเซอร์มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงและเสถียรมากกว่ากรณีไม่มี Shield นอกจากนี้ Shield ยังช่วยลดสัญญาณรบกวนและผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งยืนยันสมมุติฐานที่ตั้งไว้เกี่ยวกับประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า Magnetic Flux Density มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relationship) กับแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กก็เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานทางทฤษฎีของการตอบสนองแบบเชิงเส้นของเซนเซอร์ Hall Effect เพื่อเพิ่มความลึกซึ้งในการวิเคราะห์ อาจพิจารณาเก็บข้อมูลเชิงสถิติเพิ่มเติม เช่น ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความไม่แน่นอนของการวัด รวมถึงเงื่อนไขแวดล้อมการทดลอง เช่น อุณหภูมิหรือสนามแม่เหล็กภายนอก เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซนเซอร์ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองต้องระวังเรื่องของสนามแม่เหล็กรอบนอกที่เข้ามารบกวน หรือแม้กระทั่งวัสดุต่างๆที่สามารถเหนี่ยวนำแม่เหล็กได้
2. หาอุปกรณ์การวัดเสริมเพื่อความแม่นยำ เนื่องจากตัวชุดทดลองใช้การวัดจากการกดด้วยสายตา
3. ขณะที่อ่านค่าของตำแหน่งของความห่างจาก DRV5055 ต้องทำการอ่านที่ระดับสายตาเพื่อความแม่นยำ

อ้างอิง

- <https://evelta.com/blog/how-magnetic-sensors-actually-work-from-basic-principles-to-real-applications/>
- https://toshiba.semicon-storage.com/info/application_note_en_20210817_AKX00832.pdf?did=140380
- <https://www.mecamagnetic.com/magnetic-shielding/>
- https://www.e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_flux_density
- <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetism.html>
- <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- https://www.cncdrive.com/downloads/AMT103_datasheet.pdf
- <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf?ts=1753064339462>

การทดลองที่ 4 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

จุดประสงค์

1. เพื่อเรียนรู้วิธีการใช้งาน Load Cell
2. เพื่อให้สามารถ Calibrate และสร้าง "ตราชั่งน้ำหนัก" ของตนเองได้

สมมติฐาน

หากค่า Weight เพิ่มขึ้น V_{in}^+ และ V_{in}^- จะเพิ่มตาม และความเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) จะเป็นไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เพิ่ม

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบบน Load Cell
2. ตัวแปรตาม:
 - แรงดันที่ได้จากขา OUTPUT
 - V_{in}^+ และ V_{in}^-
3. ตัวแปรควบคุม:
 - ค่าความต้านทาน (R_g) ที่ใช้ควบคุมอัตราขยายสัญญาณ
 - แรงดันที่จ่ายเข้า INA125 และโหลดเซลล์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานของ Load Cell และ Strain Gauge

โหลดเซลล์ทำหน้าที่แปลงแรงที่กระทำให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้หลักการของเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่มีลักษณะเป็นตัวต้านทานที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (Strain) เมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรูปทรงของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้ความยาวและขนาดของเกจวัดความเครียดเปลี่ยนไป ความเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ความต้านทานของเกจเปลี่ยนตามไปด้วย การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานสามารถวัดได้โดยใช้ Wheatstone Bridge ซึ่งช่วยแปลงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่วัดและประมวลผลได้

วงจร Wheatstone Bridge

Wheatstone Bridge ประกอบด้วยตัวต้านทานสี่ตัวที่เรียงกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าโดยเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่ทราบ แนวคิดคือการสร้างสมดุลระหว่างขาของ Wheat Stone สองขา โดยแต่ละขามีตัวต้านทานสองตัว จนกระทั่งไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจจับ

การต่อวงจร Full Bridge Configuration

การต่อวงจรแบบ Full Bridge ใช้เกจวัดความเครียดที่ตัวจัดเรียงในรูปแบบ Wheat Stone โดยมีสองตัวที่รับแรงกดและสองตัวที่ไม่รับแรง การจัดเรียงนี้ช่วยวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่เกิดจากแรงที่กระทำได้อย่างแม่นยำ

สมการในการคำนวณ Output Voltage

สมการในการคำนวณแรงดันขาออก (Output Voltage) :

$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-)G$$

สมการนี้ช่วยคำนวณแรงดันขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน

Temperature Compensation ด้วย Dummy Gauges

การชดเชยอุณหภูมิช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานของเกจ การใช้ Dummy Gauges คือเกจวัดความเครียดที่ไม่ได้รับแรง แต่ติดตั้งในตำแหน่งเดียวกับเกจที่รับแรง วิธีนี้ช่วยลดผลกระทบจากอุณหภูมิ

ข้อดีของ Full Bridge เทียบกับ Quarter Bridge หรือ Half Bridge

- ความไวสูง: วัดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยได้
- ชดเชยอุณหภูมิได้ดี
- ความแม่นยำสูง

Quarter Bridge หรือ Half Bridge จะมีความไวและความแม่นยำน้อยกว่า

Instrumentation Amplifier (INA125)

INA125 เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณขาออกจากโหนดเซลล์ มีความแม่นยำสูง ขยาย Gain ปรับได้ และลดสัญญาณรบกวน

Op-amp Differential Amplifier

Differential Amplifier ใช้ Op-amp สองตัวเพื่อขยายสัญญาณที่ต่างศักย์ระหว่างขาเข้า ช่วยขยายสัญญาณขาออกจากโหนดเซลล์ที่มีความต่างศักย์ต่ำให้เหมาะสมต่อการประมวลผล

การคำนวณ Gain (INA125)

$$Gain = 4 + \frac{60k\Omega}{R_g}$$

โดยที่:

- R_g คือ ความต้านทานที่ตั้งค่า Gain

Input/Output Voltage Range

ช่วงแรงดันขาเข้าและขาออกของ Differential Amplifier ขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ INA125 สามารถปรับได้ตามการใช้งาน

Signal Conditioning

Signal Conditioning คือการปรับสัญญาณขาออกจากโหนดเซลล์ให้เหมาะสมต่อการประมวลผล รวมถึงการขยายสัญญาณ กรองสัญญาณรบกวน และแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล

ประเภทของ Signal Conditioning

- ขยายสัญญาณ: เพิ่มขนาดสัญญาณให้เหมาะสม
- กรองสัญญาณรบกวน: ลดผลกระทบต่อความแม่นยำ
- แปลงสัญญาณ: จากอนาล็อกเป็นดิจิตอล

ข้อดีข้อเสียและการใช้งาน

ข้อดี: เพิ่มความแม่นยำ ลดสัญญาณรบกวน ทำให้เหมาะสมต่อการประมวลผล

ข้อเสีย: ต้องออกแบบตามความต้องการเฉพาะและชนิดโหนดเซลล์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมอุปกรณ์ ดังนี้
 - 1.1. Single Point Load Cell YZC-131A
 - 1.2. INA125 Instrumentation Amplifier
 - 1.3. Trimpot 100 K 25 Turns
 - 1.4. Resistor 4.7K Ohm
 - 1.5. NUCLEO STM32G474RE
 - 1.6. Load Cell Xplorer – ฐานบรรจุบอร์ดควบคุม อุปกรณ์ต่าง ๆ และ 3D - Printed Part สำหรับประกอบกับ Load Cell
 - 1.7. สายจัมเปอร์
2. Set Up: Calibrate Load Cell โดยใช้น้ำหนักสูงสุดที่รับได้ (10 kg) ใช้มัลติมิเตอร์วัด V_{in}^+ กับ V_{in}^- เพื่อหาค่า R_g ที่ต่ำสุด ให้ได้ V_{out} จาก INA125 สูงสุด (ประมาณ 2.56 - 2.57 V แล้วเลือกใช้ 2.5 V เป็นค่ามาตรฐาน)
3. ชั่งน้ำหนักแต่ละค่า (เพิ่มทีละ 500 กรัม) แล้วรอสัญญาณที่ได้จาก Load Cell ให้คงที่
4. ใช้ ADC reader อ่านค่าแรงดัน ส่งออกข้อมูล (export) ไปยัง workspace
5. หาค่าเฉลี่ย (Mean) ของสัญญาณในแต่ละน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นข้อมูลตัวแทน
6. นำข้อมูลที่ได้จากแต่ละน้ำหนักมา Plot กราฟ เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับแรงดัน
7. นำข้อมูลไปคำนวณ Gain และ R_g ตามสูตรของ INA125

ผลการทดลอง

ผลการทดลองเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

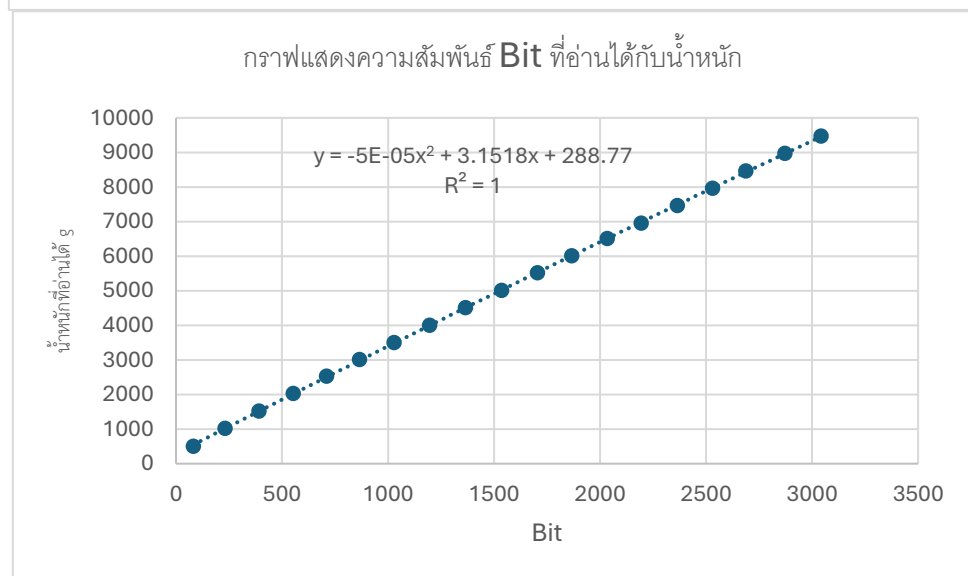
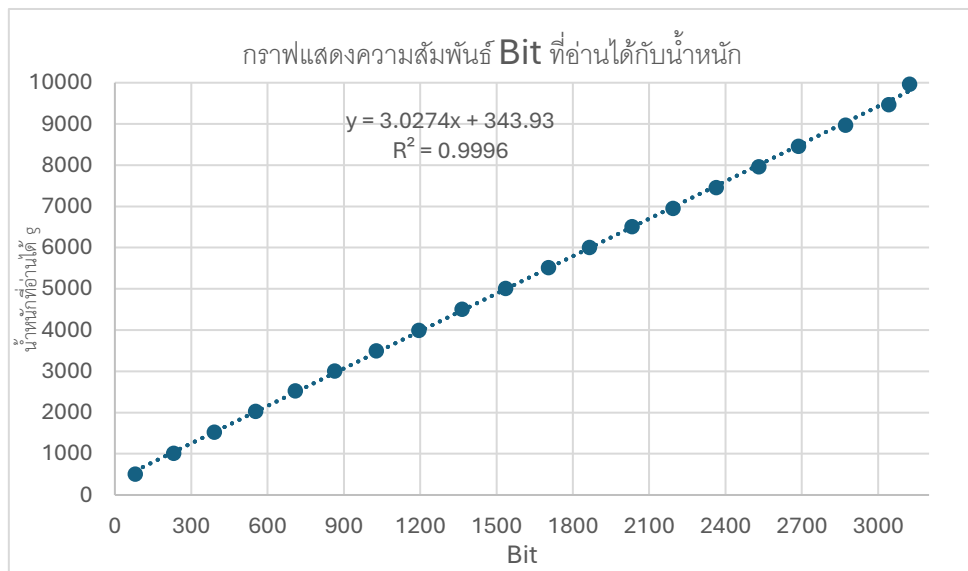
ทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่บันทึกมาแต่ละตำแหน่ง

ตารางที่ 9 ผลการทดลอง Load Cell

น้ำหนักเฉลี่ย (g)	เฉลี่ย	คิดเป็นน้ำหนัก.(g)
503	80.5863	257.0946871
1013.5	230.97755	736.8882917
1521.5	390.95125	1247.252812
2024.5	552.67725	1763.2077
2522	708.9362	2261.721043
3004.5	864.1056	2756.758393
3499	1027.3683	3277.615818
3994	1195.03545	3812.524773
4506	1365.17955	4355.335947
5010	1535.3302	4898.168018
5517.5	1704.22645	5436.998173
6006	1865.90265	5952.794184
6504.5	2032.5199	6484.35364
6954.5	2193.33315	6997.396578
7459.5	2364.1977	7542.506207
7962.5	2530.61975	8073.442915
8456.5	2686.59805	8571.0609
8967.5	2871.71025	9161.624844
9467	3041.0902	9701.998149
9965	3123.5281	9965

น้ำหนักเฉลี่ย (g)	คิดเป็นน้ำหนัก.(g)	สมการ (g)	ต่างกัน (g)	คิดเป็น %
503	257.0946871	587.8969646	84.896965	-16.87812
1013.5	736.8882917	1043.191435	29.691435	-2.929594
1521.5	1247.252812	1527.495814	5.9958143	-0.394073
2024.5	1763.2077	2017.105107	-7.3948934	0.36527
2522	2261.721043	2490.163452	-31.836548	1.262353
3004.5	2756.758393	2959.923293	-44.576707	1.483665
3499	3277.615818	3454.184791	-44.815209	1.2808

3994	3812.524773	3961.780321	-32.219679	0.806702
4506	4355.335947	4476.87457	-29.12543	0.64637
5010	4898.168018	4991.988647	-18.011353	0.359508
5517.5	5436.998173	5503.305155	-14.194845	0.25727
6006	5952.794184	5992.763683	-13.236317	0.220385
6504.5	6484.35364	6497.180745	-7.3192547	0.112526
6954.5	6997.396578	6984.026778	29.526778	-0.424571
7459.5	7542.506207	7501.302117	41.802117	-0.560388
7962.5	8073.442915	8005.128231	42.628231	-0.535362
8456.5	8571.0609	8477.336937	20.836937	-0.246401
8967.5	9161.624844	9037.745611	70.245611	-0.783335
9467	9701.998149	9550.526471	83.526471	-0.882291
9965	9965	9800.09897	-164.90103	1.654802



สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง Single Point Load Cell ร่วมกับ INA125 สามารถสรุปได้ว่า แรงที่กระทำต่อ Load Cell มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขาเอาต์พุต ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานเริ่มต้นที่ระบุไว้ว่า เมื่อมวลน้ำหนักเพิ่มขึ้น ค่า V_{in+} และ V_{in-} จากวงจร Wheatstone Bridge จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) เพิ่มขึ้นตาม ในการทดลองนี้ได้ทำการชั่งน้ำหนักตั้งแต่ 0 – 10 กิโลกรัม เพิ่มทีละ 0.5 กิโลกรัม และทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักละ 1,000 ค่าเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าเมื่อทำการ Plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับแรงดันเอาต์พุต จะได้ลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9996 – 1 ซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำในการตอบสนองของ Load Cell และความถูกต้องของการปรับ Gain และค่าความต้านทาน R_g ที่ใช้ ทำให้ระบบสามารถอ่านค่าน้ำหนักที่วางบน Load Cell ได้อย่างใกล้เคียงกับค่าจริงในระดับความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจร Full Bridge ภายใน Load Cell ทำงานร่วมกับ INA125 เพื่อขยายสัญญาณให้มีความไวและเสถียรเพียงพอต่อการวัด โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงที่กระทำกับแรงดันขาออกเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีของ Strain Gauge และ Wheatstone Bridge ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในวัสดุ ความต้านทานของเกจวัดความเครียดจะเปลี่ยนไปและถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าผ่าน INA125 อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในบางช่วงของน้ำหนักมีสาเหตุจากตัวน้ำหนักที่ใช้ ซึ่งเป็นถุงทรายที่ไม่ได้มีมวลเท่ากันทุกถุง ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อรวมหลายถุงเข้าด้วยกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอยู่ในระดับไม่เกินประมาณ 100 กรัม ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในการทดลองเชิงปฏิบัติ อีกทั้งยังยืนยันได้ว่าการคำนวณ Gain และการเลือกค่า R_g มีความเหมาะสม ทำให้ระบบสามารถนำไปต่อยอดใช้เป็นต้นแบบของเครื่องชั่งน้ำหนักหรือระบบตรวจวัดแรงในงานอุตสาหกรรมได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ตรวจสอบมวลมาตรฐานที่ใช้ในการชั่ง ควรชั่งน้ำหนักทุกตัวก่อนใช้งาน หรือใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลตั้งแต่ต้น
2. ตรวจสอบตำแหน่งการวางน้ำหนักบน Load Cell โดยต้องวางที่จุดรับแรงตรงกลาง หลีกเลี่ยงแรงด้านข้างหรือเอียง เพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อนเชิงกล (mechanical error)
3. กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เช่น ยอมให้ error ไม่เกิน $\pm 1\%$ ของน้ำหนักจริง ทำให้สรุปผลได้ชัดเจนว่าการทดลองมีความแม่นยำมากเพียงพอ

อ้างอิง

- <https://www.micro-tess.com/th/wheatstone-bridge/>
- <https://mall.factomart.com/wp-content/uploads/2018/06/Load-cell-manual.pdf>
- <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetism.html>
- <https://www.youtube.com/watch?v=MNv8ClHYkhY>
- https://www.cncdrive.com/downloads/AMT103_datasheet.pdf
- https://drive.google.com/file/d/1A1gmLgc5G4pdOS_XOE1vM2LZWA58oa46/view?usp=classroom_web&authuser=2

ภาคผนวก

Pulse Per Round

$$PPR = \frac{Count}{Read\ type}$$

Count : ค่าที่ได้จาก *Encoder*

Read type : ประเภทการอ่าน $x4 = 4$

$$x2 = 2$$

$$x1 = 1$$

Resolution

$$resolution = \frac{Angle}{PPR}$$

Angle : องศาที่หมุนใน 1 รอบ $radian = 2\pi$

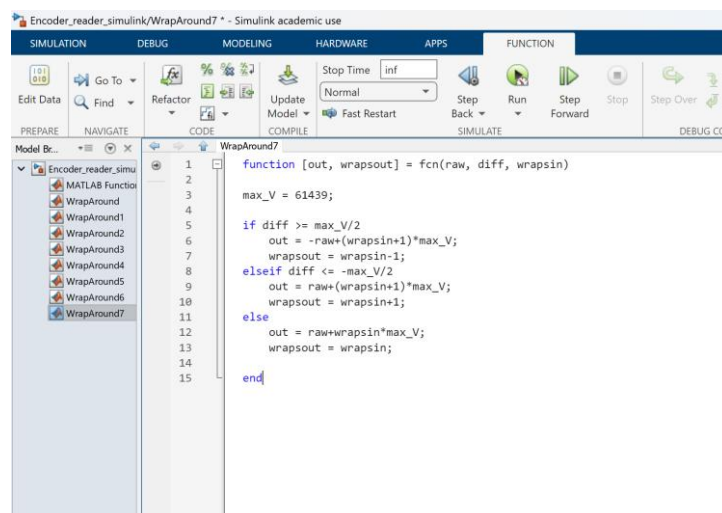
$$degree = 360$$

Position

$$Position = n_{pulse} \times resolution$$

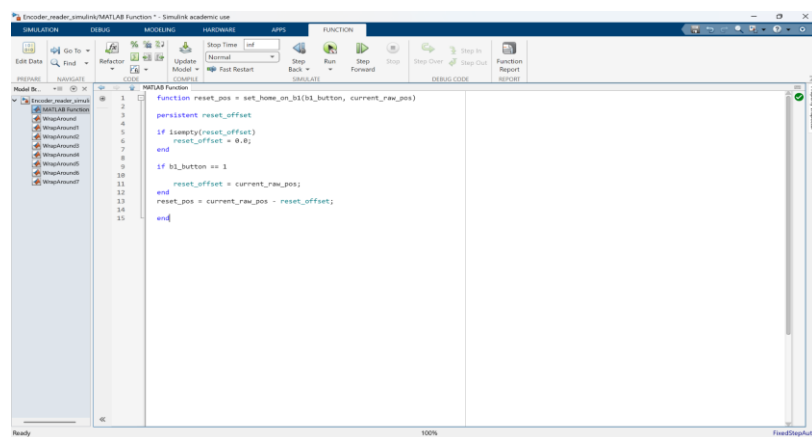
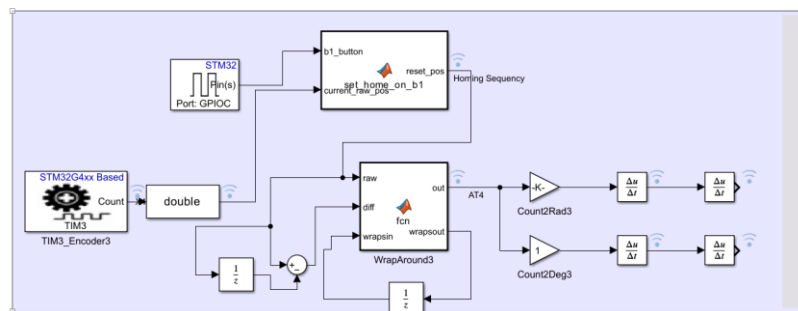
n_{pulse} : จำนวนพัลส์ที่อ่านได้

WrapAround



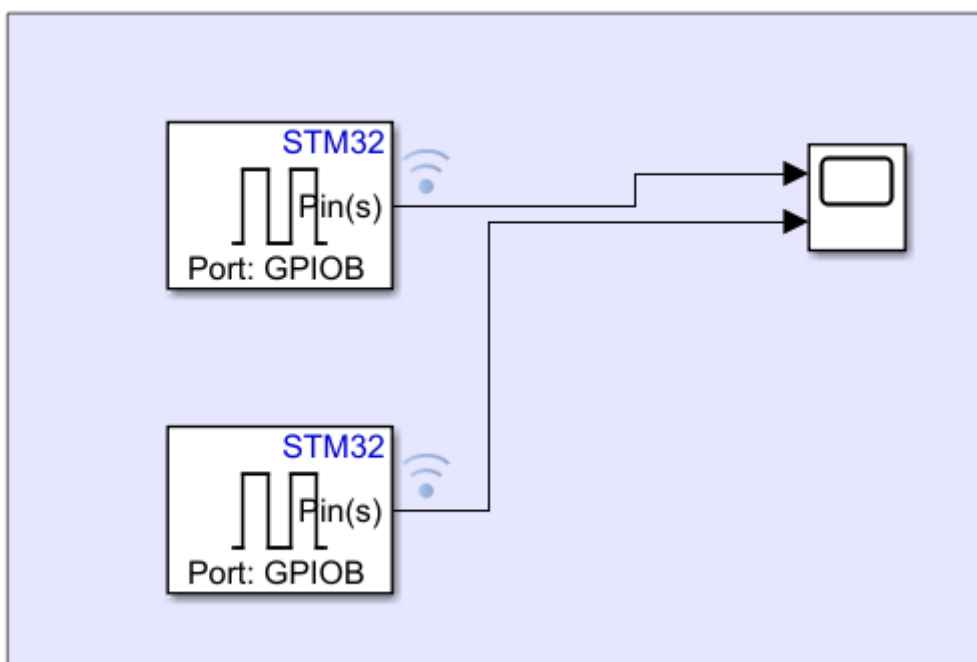
Homing sequence

Set IOC ให้ Pin PC13 เป็น INPUT สำหรับรับค่า B1 button



Polling Method

ใช้สำหรับอ่านค่าเป็น Pulse



1.4 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

การคำนวณ Gain และตัวต้านทาน R_g ของ INA125 สำหรับ Load Cell

เมื่อเริ่มออกแบบเครื่องชั่งด้วย Load Cell ร่วมกับ INA125 Instrumentation Amplifier ขั้นแรกเราต้องกำหนดน้ำหนักสูงสุดที่เครื่องชั่งสามารถรองรับได้ โดยจากโจทย์กำหนดอยู่ที่ **10 กิโลกรัม** จุดประสงค์หลักคือการหาค่า **Gain** ที่เหมาะสม เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตของ INA125 อยู่ในช่วงที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในช่วงแรงดันที่ ADC หรือไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอ่านค่าได้อย่างแม่นยำ และไม่สูงจนเกินขอบเขตที่อ่านได้ โดยจากการคำนวณ

ขั้นแรก วางน้ำหนัก **10 กิโลกรัม** ตรงจุดกึ่งกลางของ Load Cell เพื่อให้แรงกระทำสมมาตร จากนั้นใช้ **มัลติมิเตอร์** วัดแรงดันที่ขา V_{in}^+ และ V_{in}^- ของ INA125 ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความต่างศักย์ที่ Load Cell สร้างขึ้นเมื่อน้ำหนัก การคำนวณความต่างศักย์ใช้สมการ:

$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-)G$$

ค่าความต่างศักย์นี้คือสัญญาณดิบที่มีขนาดเล็กมาก เราต้องการขยายให้ใหญ่ขึ้นด้วย Gain ของ INA125 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป้าหมาย (V) เมื่อโหลดเต็มสเกล จะได้ค่าออกมา $V_{out} \approx 2.5$

ดังนั้น Gain ที่ต้องใช้จึงหาได้จาก:

$$Gain = 4 + \frac{60k\Omega}{R_g}$$

เมื่อได้ค่า Gain แล้ว จะนำไปหา **ค่าตัวต้านทาน R_g** ที่ใช้กำหนด Gain ของ INA125 โดยสูตรเดิม โดยการจัดรูปเพื่อหา R_g :

$$R_g = \frac{60k\Omega}{Gain - 4} (\Omega)$$

ผลลัพธ์ที่ได้คือค่า R_g ที่เหมาะสมในหน่วย **โอห์ม** สำหรับใช้ปรับค่า Gain ของ INA125 ในงานจริงมักใช้ **Trimpot** เพื่อปรับค่าได้ละเอียดและปรับจน V_{out} ที่น้ำหนักเต็มตรงกับค่าเป้าหมาย เช่น **2.50 V**

หลังจากตั้งค่า Gain และ R_g เสร็จ ขั้นตอนถัดไปคือการ **ตรวจสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity)** ของระบบ โดยทดสอบน้ำหนักหลายค่า เช่น 0 กก., 2 กก., 5 กก., 8 กก., และ 10 กก. แล้วบันทึกค่า V_{out} ที่ได้ในแต่ละจุด หากกราฟน้ำหนักกับ V_{out} มีความชันคงที่ แสดงว่าการขยายสัญญาณและโหลดเซลล์ทำงานถูกต้อง สามารถนำสมการนี้ไปใช้ใน **ไมโครคอนโทรลเลอร์** หรือ **ADC** เพื่อแปลงแรงดันเป็นค่าหน่วยน้ำหนักได้อย่างแม่นยำ ซึ่งได้ถูกแสดงผลไว้แล้วในส่วนของการทดลอง **1.4 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier**

การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณจาก Load Cell ด้วย MATLAB

ส่วนของ MATLAB Code ด้านล่างนี้ใช้สำหรับประมวลผลข้อมูลสัญญาณที่ได้จาก Load Cell ซึ่งถูกอ่านผ่าน ADC และส่งเข้ามาในรูปแบบ Time Series ใน Workspace โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดึงข้อมูลออกมาประมวลผล หาค่าเฉลี่ยและแสดงผลเป็นกราฟเพื่อตรวจสอบความเสถียรของสัญญาณก่อนนำไปทำการจูนค่า (Calibration)

% โหลด dataset ที่บันทึกมาจาก Workspace

```
adc_dataset = data;
```

% data คือ Time Series ที่ได้จากการอ่าน ADC ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

% ดึงข้อมูลเวลา (Time) และค่าที่อ่านได้จาก ADC (Data)

```
t = adc_dataset.Time(:);      % เวลาที่สัญญาณถูกอ่าน
```

```
y = double(squeeze(adc_dataset.Data)); % แปลงข้อมูล ADC ให้อยู่ในรูปแบบตัวเลขพร้อมใช้งาน
```

% สร้าง Time Series ใหม่เพื่อความเป็นระเบียบในการประมวลผล

```
adc_clean = timeseries(y, t, 'Name', 'ADC_Clean');
```

% แสดงกราฟสัญญาณเพื่อดูพฤติกรรมของข้อมูล

```
figure;
```

```
plot(adc_clean.Time, adc_clean.Data, 'LineWidth', 1.5);
```

```
xlabel('Time (s)');
```


```
ylabel('ADC Value');
```

```
title('ADC Signal from Load Cell');
```

```
grid on;
```

% กราฟนี้ช่วยให้เห็นว่าสัญญาณนิ่งหรือยังมีการแกว่งจาก Noise

```
% =====
```

%  คำนวณค่าเฉลี่ยต่าง ๆ

```
% =====
```

```
mean_val = mean(y);      % ค่าเฉลี่ย (Mean) ใช้เป็นตัวแทนค่าสัญญาณจริง
```

```
median_val = median(y);  % ค่ากลาง (Median) ใช้ในกรณีข้อมูลมี Noise มาก
```

```

mode_val = mode(y);    % ค่าที่พบมากที่สุด (Mode)

% แสดงผลค่าที่คำนวณได้ทางหน้าต่าง Command Window

fprintf('Mean = %.4f\n', mean_val);

fprintf('Median = %.4f\n', median_val);

fprintf('Mode = %.4f\n', mode_val);

% เพิ่มเส้นแนวนอนลงในกราฟเพื่อแสดงตำแหน่งค่าที่คำนวณได้

hold on;

yline(mean_val, 'r--', 'Mean');    % เส้นแสดงค่าเฉลี่ย

yline(median_val, 'g--', 'Median'); % เส้นแสดงค่ากลาง

yline(mode_val, 'b--', 'Mode');    % เส้นแสดงค่าที่พบบ่อย

legend('ADC Data', 'Mean', 'Median', 'Mode');

hold off;

```