

LAB 1: Sensor

Name

- นายชาติรี เงินดี 67340500008
- นายเด่นภูมิ สอนพร 67340500013
- นายธีรภัทร แลเลิศ 67340500022

Objectives

- เพื่อศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานและพฤติกรรมของเซนเซอร์แต่ละชนิด
- เพื่อทราบถึงกระบวนการทดลองที่พิสูจน์ข้อเท็จจริงระหว่างเชิงทฤษฎีและการทดลอง
- เพื่อให้สมาชิกในกลุ่มเกิดความเข้าใจ แลกเปลี่ยนความรู้เกี่ยวกับเซนเซอร์ และฝึกการทำงานเป็นกลุ่ม
- เพื่อให้สมาชิกในกลุ่มฝึกใช้โปรแกรม MATLAB ในการจัดการข้อมูลสัญญาณเซนเซอร์ให้ถูกต้อง
- เพื่อศึกษาและเข้าใจการทำ Signal Conditioning ของสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ

1.1 หัวข้อ LAB : Potentiometer

การทดลองที่ 1 การทดลองหาความสัมพันธ์การปรับ Potentiometer ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จุดประสงค์

1. เพื่อเข้าใจพื้นฐานและพฤติกรรมของ Potentiometer แต่ละชนิด
2. เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการปรับ Potentiometer ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานและแรงดันไฟฟ้า
3. เพื่อเข้าใจการนำข้อมูลดิบจากเซนเซอร์มาแปลงเป็นข้อมูลที่สามารถพิสูจน์พฤติกรรมของ Potentiometer แต่ละชนิด

สมมติฐาน

ถ้ามีการปรับค่าความต้านทานจากการหมุนหรือเลื่อน Knob ของ Potentiometer แล้วแรงดันไฟฟ้าขาออกจะเปลี่ยนแปลงตามระยะการหมุนหรือเลื่อนของ Knob

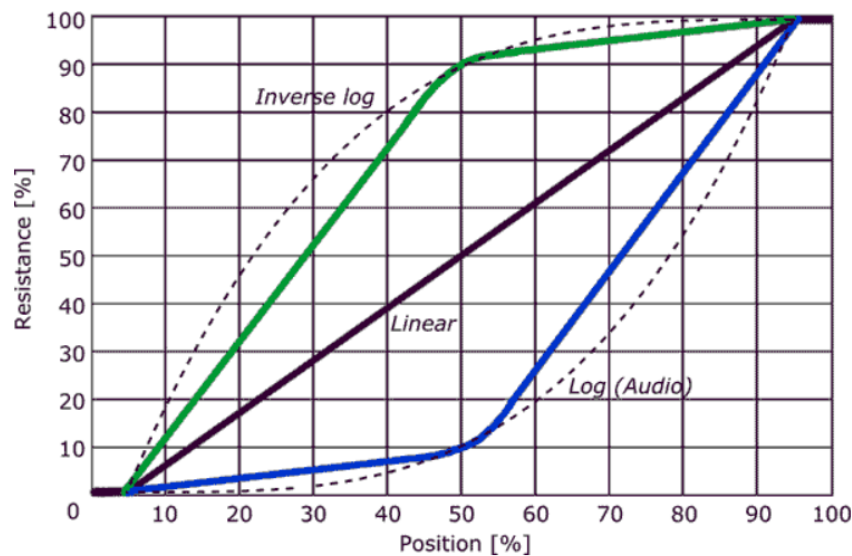
ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ระยะที่เกิดจากการหมุนหรือเลื่อน Knob ของ Potentiometer
2. ตัวแปรตาม:
 - แรงดันไฟฟ้าขาออกที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนหรือเลื่อนของ Knob
3. ตัวแปรควบคุม:
 - เวลาในการบันทึกข้อมูลของเปอร์เซ็นต์ในการปรับ Potentiometer
 - จำนวนครั้งในการบันทึกข้อมูล
 - อุณหภูมิสภาพแวดล้อม
 - ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

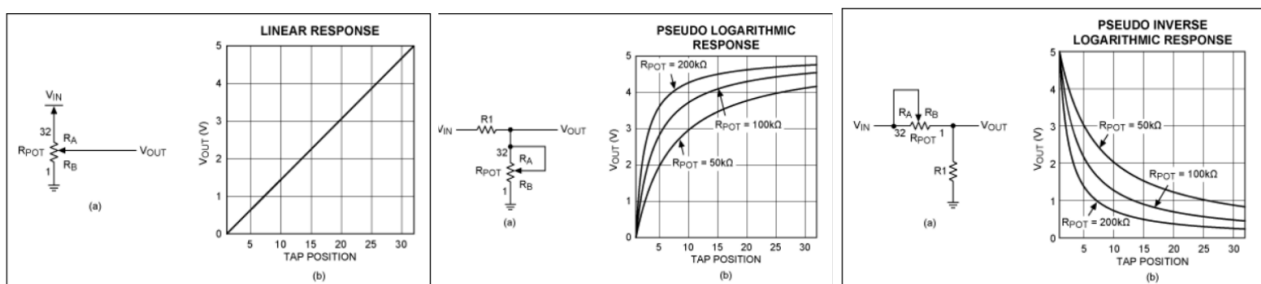
Potentiometer เป็นอุปกรณ์ต้านทานปรับค่าได้ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) โดยมีลักษณะสำคัญคือ Taper หรือความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของขาเลื่อนหรือตำแหน่งที่หมุน กับสัดส่วนความต้านทานในวงจร การเปลี่ยนตำแหน่งของ Wiper จะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนตามรูปแบบของ Taper ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ Linear (Type B), Logarithmic (Type A) และ Reverse Logarithmic (Type C) ตามที่อธิบายในบทความของ EEPower (2025) โดยแบบ Linear มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตำแหน่งและแรงดัน ในขณะที่แบบ Logarithmic มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้าในช่วงต้นและเร็วขึ้นในช่วงปลาย ซึ่งเหมาะสำหรับงานควบคุมเสียง (Audio Control) เนื่องจากการรับรู้ความดังของเสียงของมนุษย์เป็นแบบ

ลอการิทึม ส่วนแบบ Reverse Logarithmic จะให้การตอบสนองตรงข้าม คือแรงดันเพิ่มเร็วในช่วงต้นและค่อยๆ ช้าลงในช่วงปลาย เหมาะกับงานเฉพาะทาง เช่น วงจรปรับโทนเสียงหรือบาลานซ์สเตอริโอ



รูปที่ 1 กราฟแสดงพฤติกรรมของ Potentiometer ระหว่างการปรับค่าเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าความต้านทาน

นอกจากนี้ บทความจาก Analog Devices (2024) ได้เสนอแนวทางการสร้างคุณลักษณะการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้เพียง **Linear Potentiometer** ร่วมกับตัวต้านทานภายนอกเพิ่มเติมในวงจร เพื่อจำลองการทำงานให้มีลักษณะโค้งแบบ Logarithmic หรือ Reverse Logarithmic ได้ วิธีนี้ช่วยให้สามารถออกแบบการควบคุมระดับเสียงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น แม้จะไม่มี Potentiometer แบบ Logarithmic โดยตรง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มตัวต้านทานเสริมอาจทำให้ช่วงแรงดันเอาต์พุตลดลงเล็กน้อย และต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์รวมของวงจรด้วย โดยสรุป การเลือกใช้หรือออกแบบลักษณะ Taper ของ Potentiometer ให้เหมาะสมกับงาน จะช่วยให้ได้ การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่มีความละเอียดและเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด

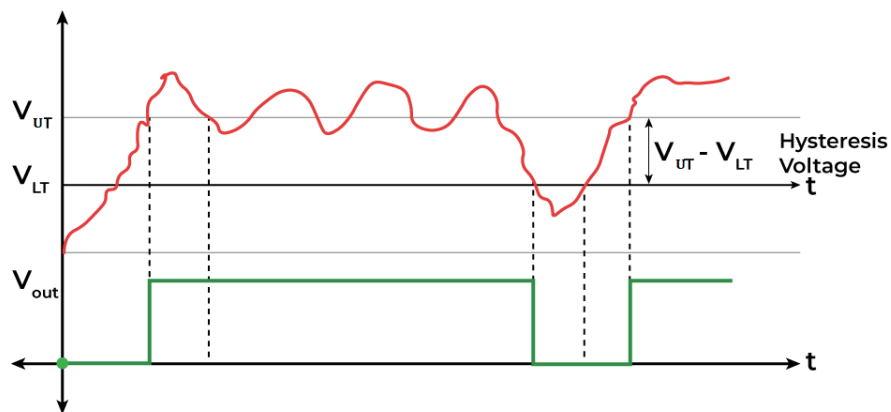


รูปที่ 2 แสดงลักษณะของวงจร Voltage Divider ที่ทำให้เกิดพฤติกรรมแต่ละ Type ของ Potentiometer

Schmitt Trigger

วงจร Schmitt Trigger ถูกออกแบบโดยนักวิจัยชาวอเมริกันชื่อ **Otto H. Schmitt** ในปี ค.ศ. 1934 เป็นวงจร **Comparator ที่มีคุณสมบัติ Hysteresis** ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog) แล้วแปลงให้

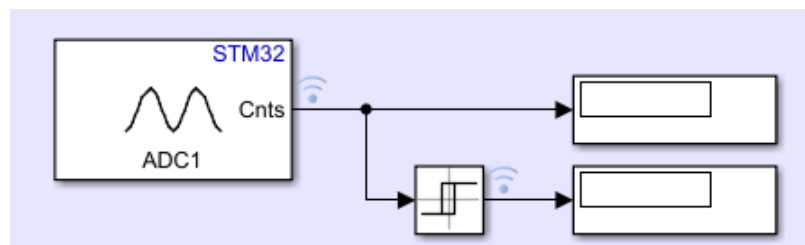
เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีความคมชัดและเสถียร (Digital) หลักการทำงานคือ การป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) เข้าขา Non-Inverting ของ Comparator เพื่อกำหนด “จุดเปลี่ยนสถานะ” สองค่า หรือที่เรียกว่า **Hysteresis** ได้แก่ ค่าขีดบน (Upper Threshold) สำหรับขณะอินพุตเพิ่มขึ้น และค่าขีดล่าง (Lower Threshold) สำหรับขณะอินพุตลดลง ซึ่งคุณสมบัติของ Hysteresis ช่วยให้วงจรสามารถ **ตัดสัญญาณรบกวน (Noise Rejection)** ได้ดี โดยเมื่อสัญญาณอินพุตมีการแกว่งเล็กน้อย เอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนสถานะผิดพลาด ทำให้สัญญาณที่ได้มีความนิ่งและเสถียรมากขึ้น ดังนั้น Schmitt Trigger จึงเป็นวงจรที่เหมาะสมสำหรับการแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่มีสัญญาณรบกวน ให้กลายเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความแม่นยำและผิดพลาดน้อย



รูปที่ 3 รูปการทำงานของวงจร Schmitt Trigger

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อสายไฟ Vcc, GND และ OUT ระหว่าง Potentiometer กับบอร์ด NUCLEO เพื่อทำการเก็บข้อมูลประเภท bit โดยกำหนด
2. Setup Simulink โดยนำ Block Relay มาต่อ กับ ADC เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt Trigger



รูปที่ 4 แสดงการจำลองวงจร Schmitt Trigger ด้วย Simulink

3. หาค่า Bit สูงสุดจาก Datasheet ของ STM32G474RE ซึ่งระบุว่าสามารถรับค่า ADC 12-bit ได้ เพื่อเป็นค่าที่ใช้สำหรับทำบัญญัติไตรยางค์เทียบ bit และ VCC (3.3 Volt)

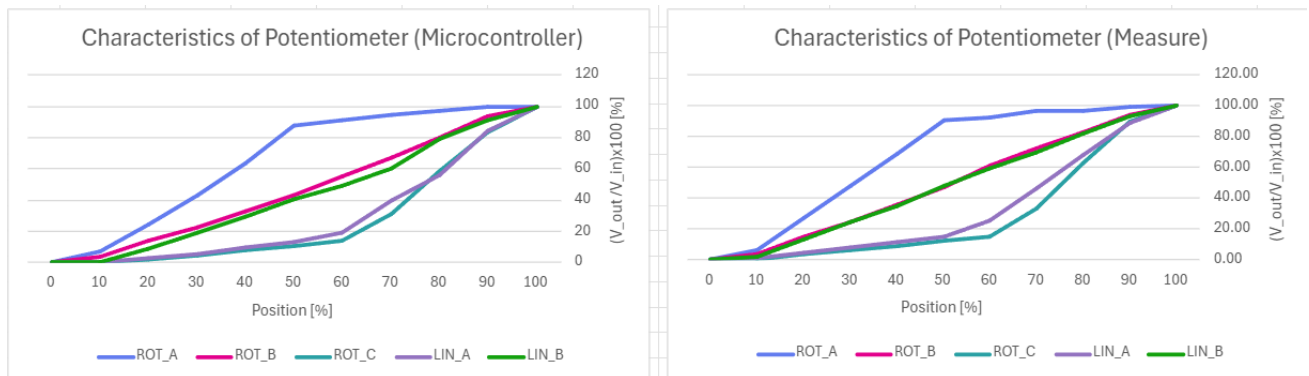
4. ทำการเก็บข้อมูลค่า bit จากเซนเซอร์ ในรูปแบบไฟล์ Excel โดยเริ่มที่ระยะของ Knob ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ และเก็บค่าประมาณ 300 ค่าต่อรอบ ทำซ้ำรอบละ 3 ครั้ง หลังจากนั้นทำการปรับมุมมองกราฟเพิ่มขึ้นรอบละ 10 เปอร์เซ็นต์
5. ทำซ้ำจนกว่า Potentiometer จะหมุนหรือเลื่อนครบ 100 เปอร์เซ็นต์
6. นำค่าที่บันทึกได้ในโปรแกรม Excel ในแต่ละ 10 เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด 3 รอบ มาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้ง เพื่อหาค่า bit เฉลี่ยในมุมมองกราฟหรือตำแหน่งที่เลื่อน

ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B		ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	
1	4056.62	4045.82	4013.44	3991.48	3986.68	100%	1	2579.80	1327.42	320.11	395.44	1156.86	40%
2	4055.66	4045.30	4013.43	3992.72	3988.29		2	2580.49	1327.52	320.05	404.46	1220.39	
3	4055.38	4045.27	4012.57	3991.80	3987.21		3	2580.86	1327.60	320.22	402.86	1217.63	
MEAN	4055.89	4045.46	4013.15	3992.00	4055.89 BIT		MEAN	2580.38	1327.51	320.13	400.92	1198.29 BIT	
VOLTAGE	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32 V		VOLTAGE	2.11	1.09	0.26	0.33	0.98 V	
ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	90%	ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	30%
1	4033.67	3811.86	3351.57	3384.58	3692.24		1	1755.39	931.55	200.34	238.51	786.97	
2	4033.65	3812.00	3352.07	3385.40	3692.75		2	1755.84	931.03	200.35	238.70	787.28	
3	4033.57	3811.69	3350.83	3384.47	3692.19		3	1756.60	931.59	200.41	238.30	785.90	
MEAN	4033.63	3811.85	3351.49	3384.81	3692.39 BIT		MEAN	1755.94	931.39	200.37	238.50	786.72 BIT	
VOLTAGE	3.30	3.13	2.77	2.82	3.02 V		VOLTAGE	1.44	0.76	0.16	0.20	0.64 V	
ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	80%	ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	20%
1	3931.19	3244.32	2338.17	2203.55	3225.771		1	997.58	555.72	84.22	111.05	378.21	
2	3931.61	3244.68	2338.42	2251.55	3225.967		2	997.76	556.27	84.24	111.22	378.70	
3	3931.63	3242.92	2337.02	2213.64	3226.066		3	998.22	555.96	84.23	110.55	377.35	
MEAN	3931.48	3243.97	2337.87	2222.91	3225.93 BIT		MEAN	997.85	555.98	84.23	110.94	378.09 BIT	
VOLTAGE	3.22	2.66	1.93	1.85	2.64 V		VOLTAGE	0.82	0.46	0.07	0.09	0.31 V	
ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	70%	ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	10%
1	3829.38	2704.14	1240.94	1556.70	2419.50		1	285.00	137.16	0.00	0.00	9.73	
2	3828.70	2703.26	1240.84	1630.68	2536.59		2	284.29	138.03	0.00	0.00	9.94	
3	3829.26	2703.96	1240.65	1567.09	2436.39		3	283.95	138.66	0.00	0.00	9.32	
MEAN	3829.11	2703.79	1240.81	1584.82	2464.16 BIT		MEAN	284.41	137.95	0.00	0.00	9.67 BIT	
VOLTAGE	3.13	2.22	1.03	1.32	2.02 V		VOLTAGE	0.23	0.11	0.00	0.00	0.01 V	
ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	60%	ROUND	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B	0%
1	3696.33	2217.60	556.61	750.49	2002.68		1	0	0	0	0	0	
2	3695.86	2216.68	556.43	738.75	1972.41		2	0	0	0	0	0	
3	3695.89	2216.91	556.61	763.83	2044.14		3	0	0	0	0	0	
MEAN	3696.02	2217.06	556.55	751.02	2006.41 BIT		MEAN	0	0	0	0	0 BIT	
VOLTAGE	3.03	1.82	0.46	0.62	1.64 V		VOLTAGE	0	0	0	0	0 V	

รูปที่ 5 แสดงการเก็บค่า bit เฉลี่ยของแต่ละระยะการเคลื่อนที่ เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันขาออก

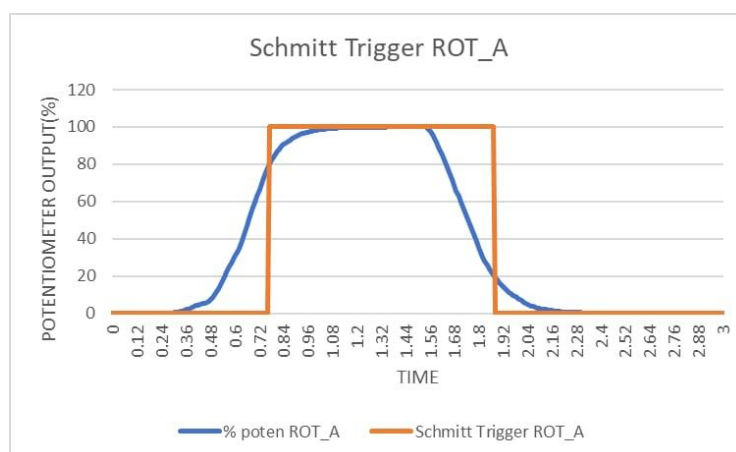
7. จากนั้นนำค่า bit ที่เฉลี่ยแล้วของแต่ละระยะ มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยวิธีเทียบบัญญัติไตรยางค์
8. นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาของแต่ละระยะ ของแต่ละชนิด Potentiometer ไป Plot กราฟออกมา โดยให้แกน X เป็นเปอร์เซ็นต์ที่ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลง และให้แกน Y เป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าขาออกเทียบกับแรงดันขาเข้า Potentiometer
9. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนแรงดันขาเข้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกของ Potentiometer (แกน Y) และเปอร์เซ็นต์การปรับ Knob (แกน X) เพื่อนำไป Plot กราฟเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงทฤษฎีและการวัดจากมิเตอร์ เพื่อเทียบความน่าเชื่อถือของข้อมูล

ผลการทดลอง



รูปที่ 6 ภาพแสดงกราฟพฤติกรรมของ Potentiometer แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงดันขาออกกับแรงดันขาเข้า (%) และการเปลี่ยนแปลงของระยะการหมุนหรือเลื่อน (%) จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า Potentiometer แต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดย รูปกราฟของ Potentiometer แบบ ROT_C, LIN_A มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแบบ ลอการิทึม (Logarithmic) รูปกราฟของ Potentiometer แบบ ROT_A มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแบบ ลอการิทึมผกผัน (Inverse Logarithmic) และรูปกราฟของ Potentiometer แบบ ROT_B, LIN_B มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (Linear) และถ้าเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการอ่านค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ กับค่าที่วัดจริง จะพบว่าค่าที่อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากความต้านทานภายในของบอร์ด ADC



รูปที่ 7 ภาพแสดงการทำงานของวงจร Schmitt Trigger

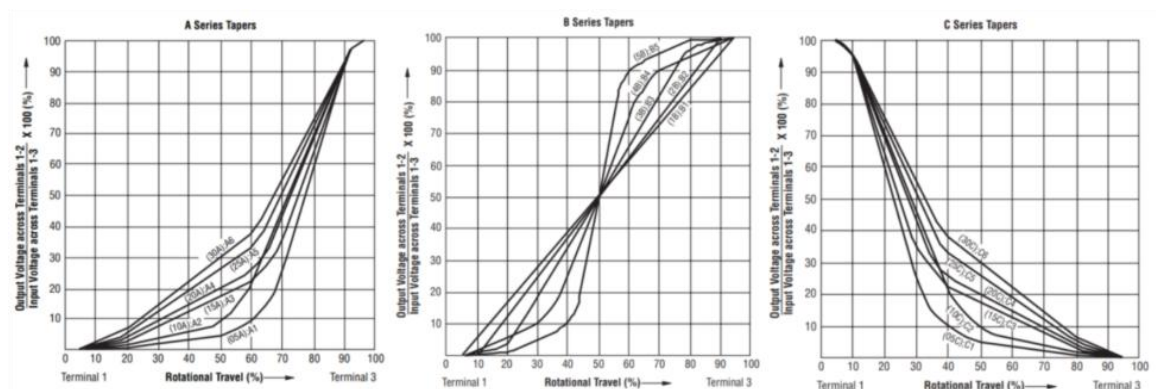
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (Time) กับสัญญาณเอาต์พุตของ Potentiometer และ Schmitt Trigger พบว่า เมื่อทำการปรับค่า Potentiometer แบบต่อเนื่อง ค่าแรงดันเอาต์พุตของ Potentiometer (เส้นสีน้ำเงิน) จะเปลี่ยนแปลงแบบแอนะล็อก (Analog) ตามลักษณะของการหมุน ในขณะที่สัญญาณเอาต์พุตของ Schmitt Trigger (เส้นสีส้ม) จะเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (Digital Step) โดยมีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำงานของวงจร เปรียบเทียบแรงดัน (Comparator) ที่มี จุดสวิตช์ (Threshold) สองระดับ คือ

- เมื่อแรงดันจาก Potentiometer สูงกว่า **Upper Threshold (80%)** → เอาต์พุตเปลี่ยนเป็น สถานะ **High**
- เมื่อแรงดันลดต่ำกว่า **Lower Threshold (20%)** → เอาต์พุตเปลี่ยนเป็น สถานะ **Low**

สรุปผลการทดลอง

Potentiometer	ROT_A	ROT_B	ROT_C	LIN_A	LIN_B
TYPE	C	B	A	A	B

ตารางที่ 1 ตารางแสดงประเภท (Type) ของ Potentiometer ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 8 ภาพแสดงพฤติกรรมของ Potentiometer แต่ละชนิด

จากผลการทดลองและการเปรียบเทียบกราฟสามารถทราบได้ว่า Potentiometer แต่ละชนิดมีพฤติกรรมใน Type ดังตารางที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดลองมีลักษณะคล้ายกันในเชิงการคำนวณทฤษฎีและในแหล่งข้อมูลที่กล่าวมา สิ่งเหล่านี้สามารถตอบสนองมาตรฐานการทดลองได้ว่าพฤติกรรมจากการหมุนของ Potentiometer ไม่ได้เพียงแค่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น แต่สามารถมีพฤติกรรมแรงดันแบบ

ลอการิทึม (Logarithm) หรือ ลอการิทึมผกผัน (Inverse Logarithm) ซึ่งถ้าเทียบกับข้อมูลการจำแนกชนิดของ Potentiometer ตามภาพที่ 6 จะสามารถแยก Type ของ Potentiometer ดังที่กล่าวตามตารางที่ 1

และจากการทดลองวงจร Schmitt Trigger ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการทำงานของ Hysteresis ในวงจร Schmitt Trigger ซึ่งช่วยลดการแกว่งของสัญญาณ และป้องกันการเปลี่ยนสถานะผิดพลาดจาก Noise ในช่วง 21-79% หรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันเล็กน้อยที่อินพุต ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความเสถียรและชัดเจนมากขึ้น ตามผลการทดลองในภาพที่ 7

อภิปรายผล

จากผลการทดลองได้กล่าวว่าพฤติกรรมจากการหมุนของ Potentiometer ไม่ได้เพียงแค่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น แต่สามารถเปลี่ยนแรงดันในเชิง ลอการิทึม (Logarithm) หรือ ลอการิทึมผกผัน (Inverse Logarithm) ในกรณีที่ Potentiometer มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนแรงดันในเชิงเส้น ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนองศาและปรับระยะทางคือ องศาที่หมุนหรือระยะที่เลื่อนแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป มีลักษณะการทำงานคล้ายวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) พิสูจน์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{out} = \frac{R}{R_{Total}} V_{vcc}$$

โดย

V_{out} = แรงดันไฟฟ้าที่ออกมา (Volt)

R = ค่าความต้านทานที่สามารถปรับได้จาก Potentiometer (ohm Ω)

R_{Total} = ค่าความต้านทานรวม (ohm Ω)

V_{vcc} = แรงดันที่ใส่เข้าไปในวงจร (Volt)

ซึ่งในสมการ Voltage Divider สามารถคำนวณหาระยะทางและมุมมองศาได้เพียงแค่เปลี่ยนตัวแปรค่าความต้านทานเป็นตัวแปรระยะทางและมุมมองศาที่ต้องการ

ในกรณีที่ Potentiometer มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนแรงดันแบบไม่เชิงเส้นพบอยู่ 2 ประเภท โดยประเภท Logarithm จะมีความสัมพันธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างช้าในช่วงต้นและเร็วขึ้นในช่วงปลาย ส่วน ลอการิทึมผกผัน (Inverse Logarithm) มีความสัมพันธ์ที่ แรงดันเพิ่มเร็วในช่วงต้นและค่อย ๆ ช้าลงในช่วงปลาย ถ้ามองลักษณะวงจรที่ทำงาน เป็นการนำ Potentiometer Type B มาต่อแบบ Voltage Divider โดยการสลับตำแหน่งของ Potentiometer Type B นี้ ส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ Logarithm และ Inverse Logarithm ได้ดังรูปที่กล่าวมาในหัวข้อเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อข้างต้น

ข้อเสนอแนะ

- สามารถใช้ Block Average ใน Simulink เพื่อช่วยเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่า bit ได้ง่ายขึ้น
- ควรทดลองให้มากกว่านี้เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

อ้างอิง

- <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/use-a-linear-potentiometer-to-create-a-nonlinear-transfer-function-for-audio-volume-control.html>
- <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/use-a-linear-potentiometer-to-create-a-nonlinear-transfer-function-for-audio-volume-control.html>
- <https://www.potentiometers.com/pdf/PTE.pdf>
- <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/schmitt-trigger/>

1.2 หัวข้อ LAB : Incremental Encoder

การทดลองที่ 1 การทดลองหาความสัมพันธ์ของโหมด Encoder X1, X2 และ X4 และทิศทางการหมุนที่ส่งผลต่อค่า Raw Counts, Relative Position, Degree, Radian Angular Velocity และเฟสความสัมพันธ์ของสัญญาณ A และ B

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder และลักษณะของสัญญาณที่ได้
2. เพื่อวัดและคำนวณค่า Pulses per Revolution (PPR) และ Angular Resolution
3. เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการอ่านสัญญาณแบบ X1, X2 และ X4
4. เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณ Phase A และ Phase B รวมถึงทิศทางการหมุน CW และ CCW
5. เพื่อเขียนโปรแกรม Wrap-Around และ Homing Sequence สำหรับอ่านตำแหน่งเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่อง
6. เพื่อศึกษาผลของความเร็วในการหมุนต่อคุณภาพสัญญาณและเปรียบเทียบ Encoder ต่างชนิด

สมมติฐาน

ถ้าเปลี่ยนโหมด Encoder จาก X1 ไป X2 จะทำให้ค่า Counts ของ Encoder เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และจาก X1 ไป X4 จะทำให้ค่า Counts ของ Encoder เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า

1. ตัวแปรต้น:

- โหมด Encoder ต่างๆ X1, X2 และ X4
- ทิศทางการหมุนของเฟลา (CW หรือ CCW)

2. ตัวแปรตาม:

- ค่า Raw Counts, Relative Position, Degree, Radian และ Angular Velocity
- เฟสความสัมพันธ์ของสัญญาณ A และ B

3. ตัวแปรควบคุม:

- จำนวนการหมุน Encoder (3 ครั้ง)
- ระยะการหมุน Encoder ในแต่ละครั้ง (360 องศา)
- ชนิดและรหัส ของ Encoder (AMT103-V, BOURNS PEC11R-4220F-N0024)
- แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ Encoder (3.3V)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Incremental Encoder เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพลลาให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบดิจิทัลหรือแอนะล็อก เพื่อระบุตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ของเพลลา

หลักการทำงานของ Incremental Encoder คือ เมื่อเพลลาหมุน แผ่นดิสก์ภายในที่มีช่องแสงหรือขั้วแม่เหล็กจะหมุนตาม เซนเซอร์ตรวจจับ (Optical หรือ Magnetic Sensor) จะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสงหรือสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ออกมาเป็นชุด ๆ

ในกรณีของ Optical Encoder แสงจาก LED จะส่องผ่านช่องแสงของแผ่นดิสก์ หากเพลลาหมุน ช่องแสงจะสลับเปิด-ปิด ทำให้โฟโตดีเทคเตอร์ตรวจจับเป็นสัญญาณพัลส์ได้

ส่วน Magnetic Encoder จะใช้แผ่นดิสก์ที่มีขั้วแม่เหล็ก N-S สลับกัน เมื่อเพลลาหมุน เซนเซอร์แม่เหล็กจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและให้พัลส์ออกมาแทน

สัญญาณเอาต์พุตของ Incremental Encoder มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแสงหรือสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะมี 2 ช่องสัญญาณหลักคือ Channel A และ Channel B เฟสที่เหลื่อมกันนี้ช่วยให้สามารถระบุทิศทางหมุนได้:

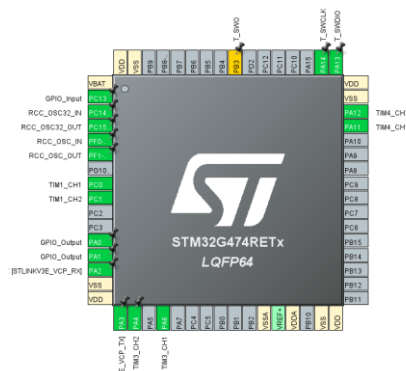
- เมื่อหมุน ตามเข็มนาฬิกา (CW) → เฟสของสัญญาณ A จะนำ B
- เมื่อหมุน ทวนเข็มนาฬิกา (CCW) → เฟสของสัญญาณ B จะนำ A

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เริ่ม Setup IOC โดยการเข้า CubeMX ไปยัง Timers และเลือก TIM1, TIM3, TIM4 ตั้งค่า mode Combined Channels เป็น Encoder Mode และปรับ Counter Period เป็น 61439 ในช่อง Configuration(สามารถตั้งเป็นค่าอื่นได้ครบใดที่ไม่เกิน 2^{16}) ปรับ Encoder Mode ในช่อง Configuration ของแต่ละ TIM เป็นดังนี้

- TIM1 เป็น Encoder Mode x1_TI1 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X1
- TIM3 เป็น Encoder Mode TI1 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X2
- TIM4 เป็น Encoder Mode TI1 and TI2 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X4

2. เชื่อมต่อสายระหว่าง Encoder กับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE ตาม Pin Out view ที่แสดงดังรูป

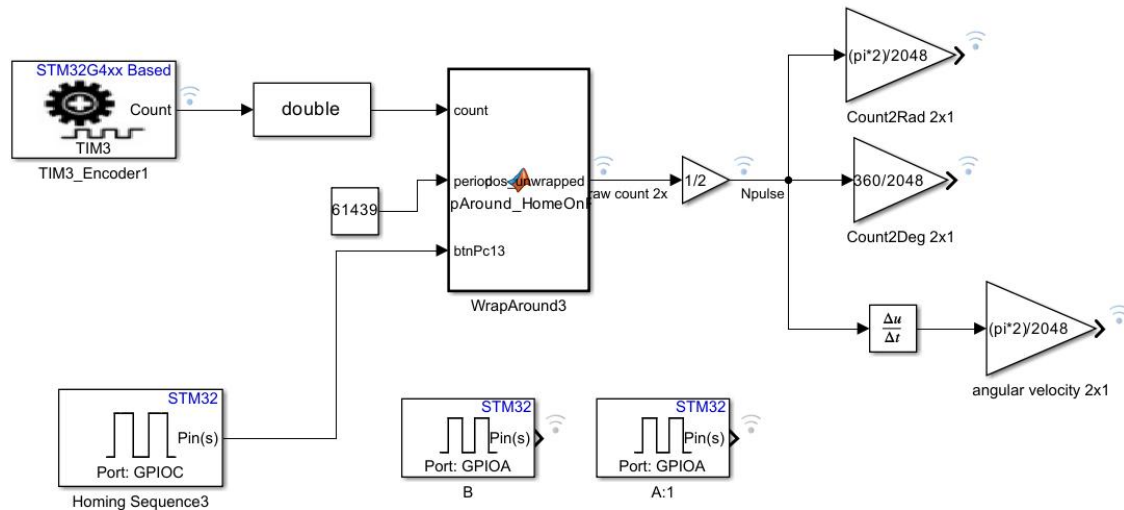


รูปภาพที่ 9 Pin Out view

3. Setup Simulink โดยแปลงค่าที่ได้จาก Encoder เป็นชนิด double เพื่อใช้คำนวณใน MATLAB Function ได้ หลังจากผ่าน MATLAB Function ค่าที่ออกมาจะเป็นค่า count จากนั้นปรับ Scale ตาม X1, X2, X4 ด้วย Gain ก็จะได้ค่า n_{pulse} หลังจากนั้นเอาค่าที่ได้ไปหา Radian และ Angular Velocity ด้วยสูตร

$$\text{Radian } \theta = res_{\theta} * n_{pulse} \quad \text{Angular Velocity } \omega = res_{\theta} * \frac{dn_{pulse}}{dt}$$

การหา Output A,B สามารถทำได้ด้วยการใส่ Digital Port Read แล้วตั้งเป็นขา A,B ตาม Pin Out view



รูปที่ 10 แสดงการแปลงค่า Counts เป็น Degree Radian และ Angular Velocity ด้วย Simulink

4. Setup Code Wrap-around และ Homing Sequence

```

1 function pos_unwrapped=wrapAround_HomeOnPA5(count,period,btnPc13)
2 %Inputs:
3 %count : ค่าจากตัวนับของ TIMx encoder
4 %period : คาบของสัญญาณของเคาน์เตอร์ (61439) → โหมดสลับ = period + 1
5 %btnPc13 : สัญญาณปุ่ม 1 = กด, 0 = ไม่กด เพื่อ set home
6 %Output:
7 %pos_unwrapped : ค่าตำแหน่งสะสมแบบต่อเนื่อง (ใช้เชื่อมเป็นสายต่อเนื่อง)
8
9 persistent prevCount pos
10 persistent stableBtn prevStable
11 persistent cnt
12
13 if isempty(prevCount)
14 % ตรวจสอบฟังก์ชันเพิ่งเริ่มทำงาน (ยังไม่มีค่าเก่า)
15 prevCount=double(count); % ตั้งค่า count เริ่มต้น
16 pos=0; % เริ่มตำแหน่งที่ 0
17 stableBtn=false; % สถานะปุ่มเริ่มต้น = ไม่กด
18 prevStable=false; % สถานะก่อนหน้าเริ่มต้น = ไม่กด
19 cnt=uint16(0); % ตัวนับสัญญาณเริ่มต้น = 0
20 end
21
22 M=double(period)+1.0; % โหมดสลับจริงของเคาน์เตอร์ (เช่น 61439+1=61440)
23 half=floor(M/2.0); % ครึ่งหนึ่งของโมดูลัส ใช้สำหรับตรวจสอบการ overflow
24 d=double(count)-prevCount; % คำนวณความต่างของ count ระหว่างรอบนี้กับรอบก่อน
25
26 if d>half
27 d=d-M; % ถ้าค่าที่วัดได้มากกว่าครึ่ง → ถือว่า wrap จากสูงที่สุดไปต่ำสุด
28 elseif d<-half
29 d=d+M; % ถ้าค่าที่วัดได้ต่ำกว่าครึ่ง → ถือว่า wrap จากต่ำสุดไปสูงที่สุด
30 end
31
32 pos=pos+d; % สะสมค่าตำแหน่งแบบต่อเนื่อง (รวมรอบที่เปลี่ยน)
33 prevCount=double(count); % เก็บค่า count ปัจจุบันไว้เป็นค่าเดิมสำหรับรอบถัดไป
34
35 %----- HOMING SEQUENCE -----
36 N=uint16(5); % จำนวน sample ที่ใช้สำหรับนับ (5 sample → ~5 ms)
37 raw=(btnPc13~=0); % อ่านค่าปุ่ม → true ถ้ากด (แปลงเป็น boolean)
38
39 if raw==stableBtn
40 cnt=uint16(0); % ถ้าสถานะปุ่มไม่เปลี่ยน → รีเซ็ตตัวนับสัญญาณ
41 else
42 if cnt<N
43 cnt=cnt+1; % ถ้ากำลังเปลี่ยนสถานะ → เพิ่มตัวนับ
44 end
45 if cnt==N
46 stableBtn=raw; % ถ้าค่าที่วัดได้ครบ N sample → ยอมรับสถานะใหม่
47 cnt=uint16(0); % รีเซ็ตตัวนับหลังจากยืนยันสถานะใหม่
48 end
49 end
50
51 rising=(stableBtn==true)&&(prevStable==false);
52 % ตรวจสอบขาขึ้น (จากไม่กด → กด)
53
54 prevStable=stableBtn; % เก็บสถานะปุ่มไว้เป็นค่าก่อนหน้าในรอบถัดไป
55
56 if rising
57 pos=0.0; % ถ้ามีขาขึ้น → รีเซ็ตตำแหน่ง = 0 (Home)
58 end
59
60 pos_unwrapped=pos; % สัญญาณเอาต์พุต (กลับซ้ายที่ทิศทาง)
61 end
62

```

รูปที่ 11 Code Wrap-around และ Homing Sequence

5. การหาค่า res_{θ} และ PPR

การหา PPR หาได้จากการหมุน knob ในโหมด X1 ให้ได้ 360 องศาและอ่านค่า raw count ที่เกิดจากการหมุนแล้วนำไปเปรียบเทียบกับ data sheet ของ encoder ตัวนั้น

Time	Raw X1
9	2071
9.1	2066
9.2	2067
9.3	2067
9.4	2067
9.5	2067
9.6	2065
9.7	2068
9.8	2068
9.9	2068
10	2068

Resolution (PPR)
2048
1024
1000
800
512
500
400
384
256
250

รูปที่ 12 Raw X1 ของ AMT103-V ที่ 360 Degree

รูปที่ 13 ค่า PPR ของ Datasheet AMT103-V

จะเห็นว่าค่า Raw X1 มีค่าใกล้เคียง 2048 PPR มากที่สุดแสดงว่า Encoder AMT103-V มี PPR = 2048

Time	Raw X1
12	25
12.1	25
12.2	25
12.3	25
12.4	25
12.5	25
12.6	25
12.7	25
12.8	25
12.9	25
13	25

Resolution
0012 = 12 Pulses per 360 ° Rotation
0018 = 18 Pulses per 360 ° Rotation
0024 = 24 Pulses per 360 ° Rotation

รูปที่ 14 Raw X1 ของ PEC11R ที่ 360 Degree

รูปที่ 15 ตารางค่า PPR ของ Datasheet PEC11R

จะเห็นว่าค่า Raw X1 มีค่าใกล้เคียง 24 PPR มากที่สุดแสดงว่า Encoder PEC11R มี PPR = 24

การหา res_{θ} ของ Encoder PEC11R และ AMT103-V ด้วยสูตร

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

จะได้ ค่า res_{θ} ดังตาราง

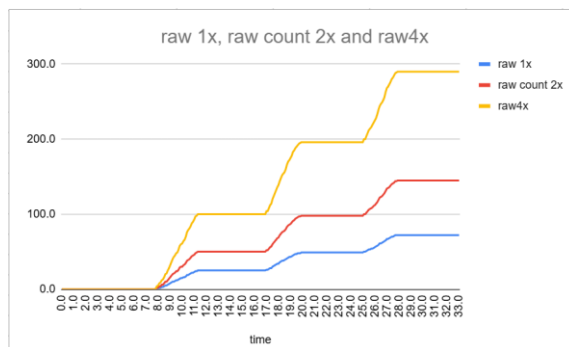
ชนิด Encoder	res_{θ}
AMT103-V	$\frac{2\pi}{2048}$
PEC11R	$\frac{2\pi}{24}$

ตารางที่ 2 ค่า Res_{θ} ของ AMT103-V และ PEC11R

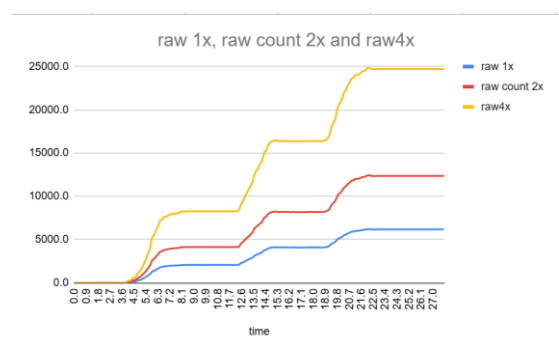
- Run Simulink เพื่อหาค่าและเก็บค่า Raw Counts, Relative Position, Degree, Radian และ Angular Velocity ของ Encoder 2 อัน ทั้ง 3 mode (X1, X2, X4) เป็น Excel โดยการหมุน knob 3 ครั้ง ครั้งละ 360 องศา โดยทำทั้งหมด 3 ครั้ง

ผลการทดลอง

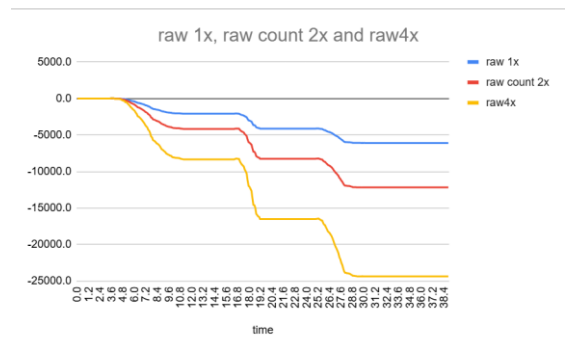
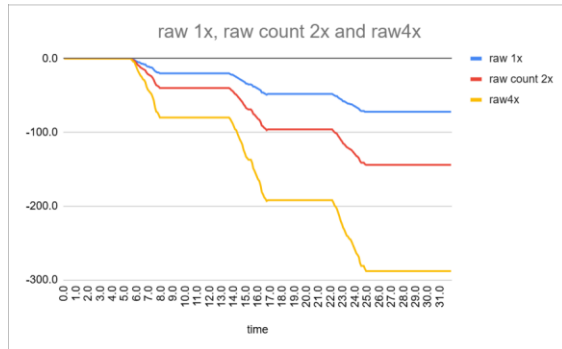
- การเปรียบเทียบความแตกต่างของการอ่าน X1, X2 และ X4



รูปที่ 16 Raw Count ของ PEC11R ในทิศตามเข็มนาฬิกา



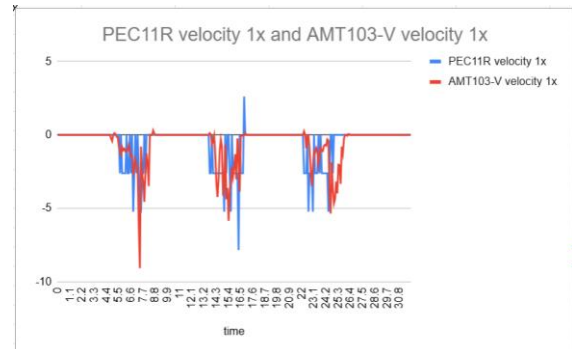
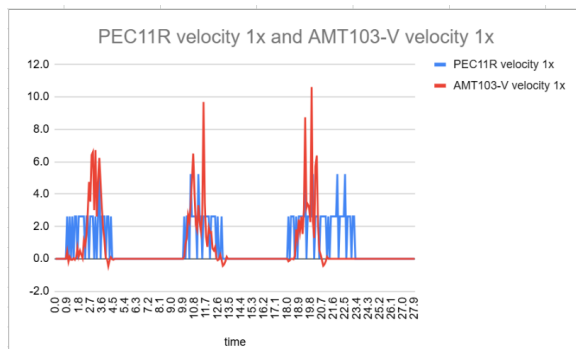
รูปที่ 17 Raw Count ของ AMT103-V ในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 18 Raw Count ของ PEC11R ในทิศทวนเข็มนาฬิกา รูปที่ 19 Raw Count ของ AMT103-V ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

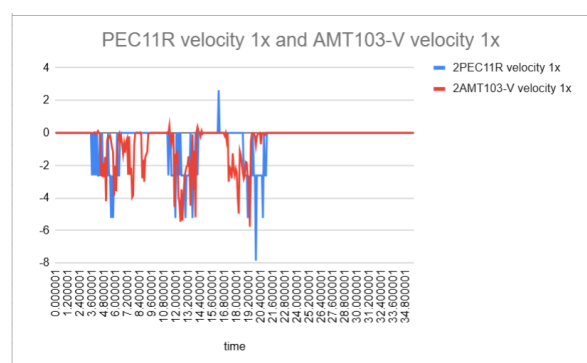
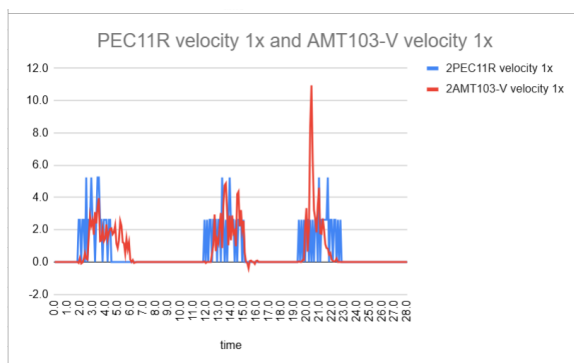
จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Raw4X มีค่าเป็น 4 เท่าของ Raw1X และ Raw2X มีค่าเป็น 2 เท่าของ Raw1X ไม่ว่าจะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา,ตามเข็มนาฬิกาหรือจาก Encoder PEC11R, AMT103-V ก็ตาม

2. การเปรียบเทียบผลของความเร็วในการหมุนต่อคุณภาพสัญญาณของ Incremental Encoder ที่แตกต่างกันได้



รูปที่ 20 ค่า Angular Velocity ในทิศตามเข็มนาฬิกา ครั้งที่ 1

รูปที่ 21 ค่า Angular Velocity ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ครั้งที่ 1

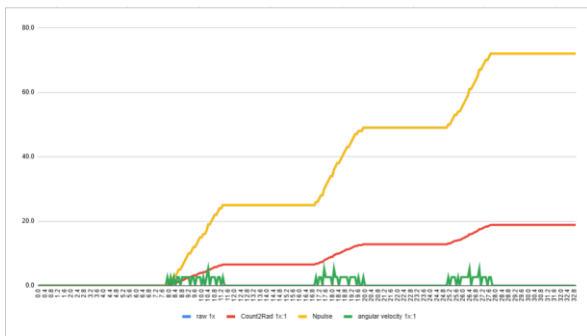


รูปที่ 22 ค่า Angular Velocity ในทิศตามเข็มนาฬิกา ครั้งที่ 2

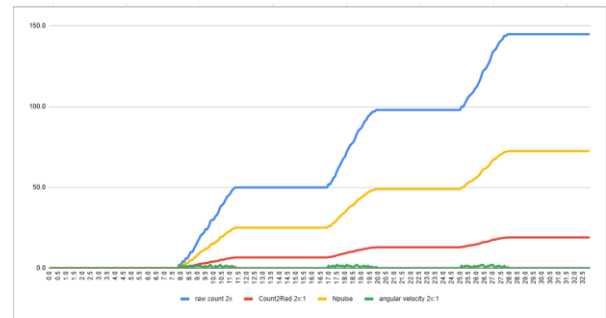
รูปที่ 23 ค่า Angular Velocity ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ครั้งที่ 2

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า Encoder AMT103-V มีความ Sensitive มากกว่า PEC11R จากค่า Angular Velocity ที่มีความอ่อนไหวต่อการหมุนมากกว่า PEC11R

3. แปลงค่า Raw Counts เป็น Relative Position (Pulses), Angular Position (Radians) และ Angular Velocity (rad/s) ของ Encoder PEC11R, AMT103-V



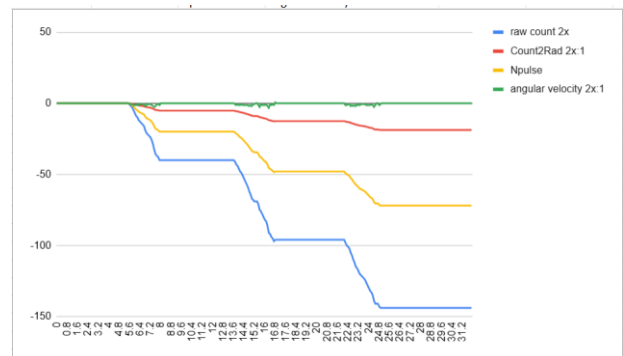
รูปที่ 24 แสดงค่าของ PEC11R (X1) ในทิศตามเข็มนาฬิกา



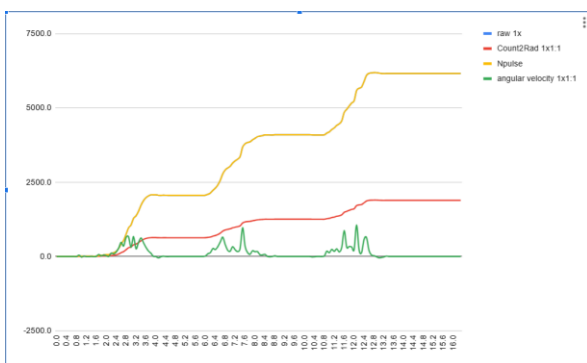
รูปที่ 25 แสดงค่าของ PEC11R (X2) ในทิศตามเข็มนาฬิกา



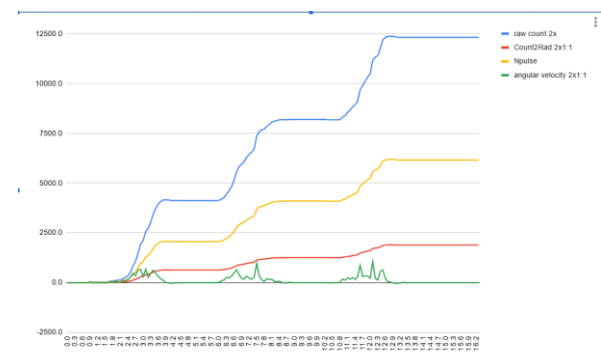
รูปที่ 26 แสดงค่าของ PEC11R (X1) ในทิศทวนเข็มนาฬิกา



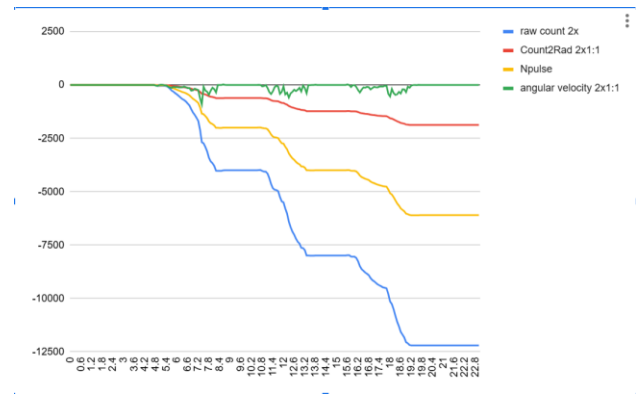
รูปที่ 27 แสดงค่าของ PEC11R (X2) ในทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 28 แสดงค่าของ AMT103-V (X1) ในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 29 แสดงค่าของ AMT103-V (X2) ในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 30 แสดงค่าของ AMT103-V (X1) ในทิศทวนเข็มนาฬิกา รูปที่ 31 แสดงค่าของ AMT103-V (X2) ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

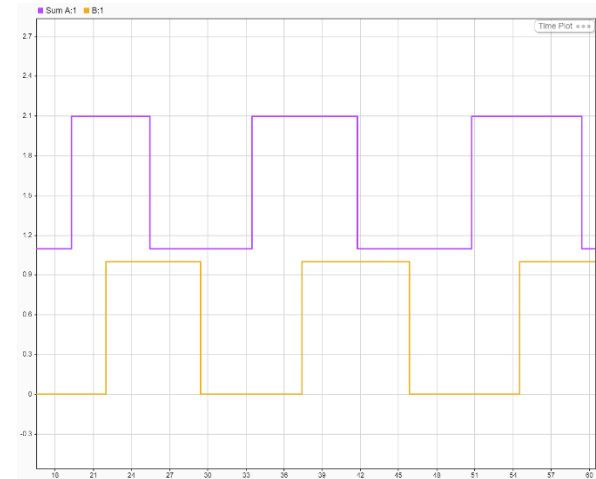
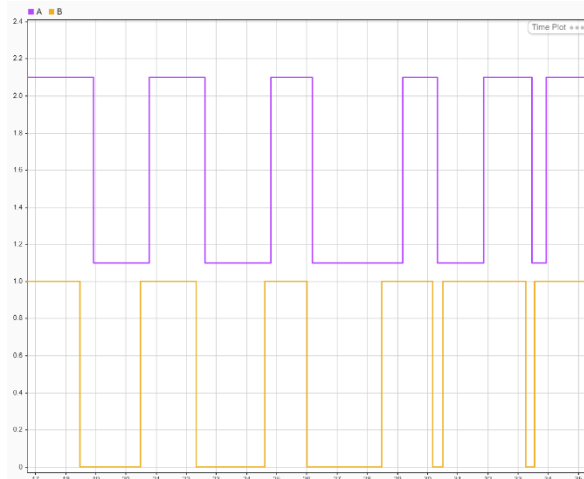
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า PEC11R มีความละเอียดต่ำกว่า AMT103-V

แสดงให้เห็นว่า PEC11R มีกราฟที่เป็น step AMT103-V มีกราฟที่เป็นแบบ Continuous

แสดงให้เห็นว่า PEC11R และ AMT103-V มีการแสดงทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาที่ถูกต้องทั้งคู่

แสดงให้เห็นว่า PEC11R มี noise ที่เกิดขึ้นน้อยกว่า AMT103-V

4. กราฟ Phase Relationship ของสัญญาณ A, B ได้



รูปที่ 32 กราฟแสดง Output A, B ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 33 กราฟแสดง Output A, B ในทิศตามเข็มนาฬิกา

จากกราฟสัญญาณที่ได้ (รูปที่ 1 และรูปที่ 2) พบว่าสัญญาณ A (สีม่วง) และสัญญาณ B (สีส้ม) เป็นสัญญาณแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ที่มีความถี่เท่ากัน แต่มีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) กันประมาณ 90 องศา โดย

- รูปที่ 32 แสดงให้เห็นว่าเป็นการหมุนแบบทวน เพราะ สัญญาณ B จะนำ A
- รูปที่ 33 แสดงให้เห็นว่าเป็นการหมุนแบบตาม เพราะ สัญญาณ A จะนำ B

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ **Incremental Encoder** และเปรียบเทียบโหมดการอ่านสัญญาณ X1, X2 และ X4 พบว่าโหมดการอ่านแต่ละแบบมีผลโดยตรงต่อ **ความละเอียด (Angular Resolution)** ของการวัดตำแหน่งเชิงมุม กล่าวคือ

- โหมด **X1** จะนับพัลส์เพียง 1 ครั้งต่อคาบสัญญาณ
- โหมด **X2** จะนับทั้งขาขึ้นและขาลงของสัญญาณเดียวกัน ทำให้จำนวนพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของ X1
- โหมด **X4** จะนับทุกขอบของสัญญาณทั้ง A และ B รวมกัน ทำให้จำนวนพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของ X1

ผลการทดลองยืนยันตามสมมติฐานว่า เมื่อเพิ่มโหมดการอ่านจาก $X1 \rightarrow X2 \rightarrow X4$ ความละเอียดของ Encoder จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้การวัดมุมมีความละเอียดและต่อเนื่องมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันสัญญาณจะมีโอกาสเกิด **Noise** มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อหมุนด้วยความเร็วสูง

ในการเปรียบเทียบระหว่าง **Encoder รุ่น AMT103-V (2048 PPR)** และ **PEC11R (24 PPR)** พบว่า

- **AMT103-V** มีความละเอียดสูงกว่า สามารถตรวจจับการหมุนได้ต่อเนื่องและแม่นยำมากกว่า แต่สัญญาณมีความผันผวนและไวต่อการรบกวนมากขึ้น
- **PEC11R** ให้สัญญาณเอ้าต์พุตเป็นขั้น (Step) ความละเอียดต่ำกว่า แต่มีความเสถียรสูงและทนต่อสัญญาณรบกวน เหมาะกับงานควบคุมแบบทั่วไป เช่น ปุ่มปรับค่าหรือการเลือกเมนู

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สัญญาณ **Phase A และ B** พบว่ามีการเลื่อนเฟสกันประมาณ 90 องศา ซึ่งสามารถใช้บ่งบอกทิศทางการหมุนของเพลลาได้อย่างถูกต้อง โดย

- หากสัญญาณ **A** นำ **B** \rightarrow หมุนตามเข็มนาฬิกา (CW)
- หากสัญญาณ **B** นำ **A** \rightarrow หมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนโหมดการอ่านของ **Incremental Encoder (X1, X2, X4)** ส่งผลโดยตรงต่อจำนวนพัลส์ที่นับได้ (Raw Counts) และความละเอียดในการวัดตำแหน่งเชิงมุม โดยในโหมด **X2** ค่าพัลส์ที่นับได้จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของโหมด X1 และในโหมด **X4** จะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า ของ X1 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของการนับสัญญาณขอบทั้งขาขึ้นและขาลงของช่องสัญญาณ A และ B การเพิ่มความละเอียดของการนับทำให้ Encoder สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวของเพลลาได้ละเอียดและต่อเนื่องมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มโหมดการอ่านให้ละเอียดขึ้นก็มีข้อจำกัดในด้านความเสถียรของสัญญาณ กล่าวคือ เมื่อระบบมีความละเอียดมากขึ้น จะมีโอกาสเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) หรือการนับพัลส์ซ้ำในช่วงที่ความเร็วการหมุนสูง

AMT103-V ให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความละเอียดและความไวสูงกว่า สามารถแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมได้อย่างต่อเนื่อง (continuous) และมีความสอดคล้องกับทิศทางการหมุนทั้ง CW และ CCW แต่ในขณะเดียวกันสัญญาณมีลักษณะผันผวนมากกว่า เนื่องจากความละเอียดสูงทำให้ระบบไวต่อสัญญาณรบกวนหรือการสั่นสะเทือนของเฟลา

PEC11R มีจำนวนพัลส์ต่อรอบน้อยกว่า ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นขั้น (step) แต่มีความนิ่งกว่า เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดมาก เช่น การตรวจนับการหมุนแบบหยาบหรืองานควบคุมแบบ manual knob

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Encoder แต่ละชนิดมีข้อดี-ข้อจำกัดที่แตกต่างกัน และการเลือกใช้งานต้องพิจารณาตามลักษณะงาน

ข้อเสนอแนะ

- ควรทดสอบความเสถียรของสัญญาณภายใต้ความเร็วรอบสูงกว่านี้ เพื่อศึกษาขีดจำกัดของการอ่านพัลส์
- อาจเพิ่มการกรองสัญญาณ (Filter) หรือใช้ **Debounce Logic** ใน Simulink เพื่อปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ

อ้างอิง

- <https://www.dynapar.com/knowledge/encoder-basics/encoder-types/incremental-encoders>
- https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Pec11r&gad_source=1&gad_campaignid=170327939&gclid=Cj0KCQjw9obIBhCAARIsAGHm1mTPYBdvDbdvEQzuFo8YGt76SF61LdQpR4KxgBYWgJGku7YWv_wRYX8aArDNEALw_wcB
- https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Amt103-v%20datasheet&gad_source=1&gad_campaignid=163458844&gclid=Cj0KCQjw9obIBhCAARIsAGHm1mQyCK3NAWCiTYcYGil1-if_hSIUfmmZX1Yss2CXL23tv0Q9B0sH2MgaAn99EALw_wcB

1.3 หัวข้อ LAB : Magnetic Sensor

การทดลองที่ 1 การทดลองความสัมพันธ์ของระยะห่างกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของ Magnetic Sensor

จุดประสงค์

1. เพื่อเข้าใจพื้นฐานและพฤติกรรมของ Magnetic Sensor
2. เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้า
3. เพื่อเข้าใจการนำข้อมูลดิบจากเซนเซอร์มาแปลงเป็นข้อมูลที่สามารถพิสูจน์พฤติกรรมของ Magnetic Sensor
4. เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของผลการทดลองการใส่ Shield และ ไม่ใส่ Shield

สมมติฐาน

ถ้ามีการปรับระยะห่างของระหว่างแม่เหล็กกับ Sensor ในระยะที่กำหนด แล้วสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น

ตัวแปร

2. ตัวแปรต้น:
 - ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Sensor
3. ตัวแปรตาม:
 - สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางระหว่างแม่เหล็กกับ Sensor
4. ตัวแปรควบคุม:
 - เวลาในการบันทึกข้อมูล
 - ชนิดและรหัส ของ Magnetic Sensor
 - อุณหภูมิสภาพแวดล้อม
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ Magnetic Sensor

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานของ Magnetic Sensor หรือเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของ Hall Effect ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และมีสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนเบี่ยงตัวไปด้านหนึ่งของแผ่น ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่างขอบทั้งสองด้านของแผ่น เรียกว่า แรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) โดยแรงดันนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ แรงดันที่เกิดจาก Hall Effect จะถูกนำไปขยายสัญญาณและปรับค่าชดเชยด้วยวงจรภายในของเซนเซอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าแอนะล็อก (Analog Output Voltage) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density; B) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าประมาณ ครึ่งหนึ่งของแรงดันจ่ายไฟ ($V_{CC}/2$) หากสนามแม่เหล็กจากขั้วใต้ (South Pole) เข้าใกล้เซนเซอร์ แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากขั้วเหนือ (North Pole) เข้าใกล้ แรงดันเอาต์พุตจะลดลง

การคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

เซนเซอร์ชนิด Hall Effect อย่าง DRV5055 จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการในเอกสารข้อมูล (Datasheet, Section 7.3.2 *Magnetic Response*) ดังนี้

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

โดยที่ $V_q = 1.65 \text{ V}$

$Sensitivity_{25^\circ C} = 30 \text{ mV/mT}$

$S_{TC} = 0.12 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

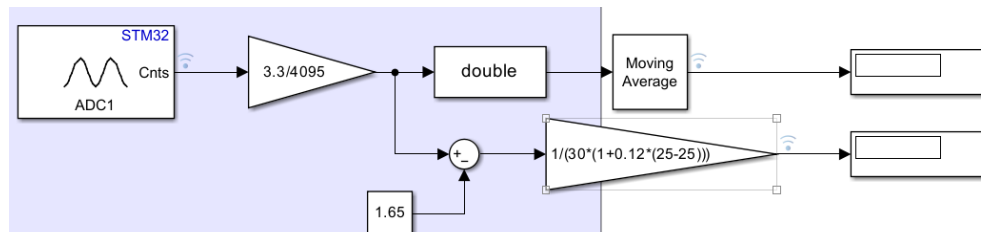
$T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อสายไฟ V_{CC} , GND และ OUT ระหว่าง Magnetic Sensor (DRV5055) กับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE เพื่อทำการเก็บข้อมูลประเภท ADC 12-bit
2. Setup Simulink โดยใช้ Block Gain เพื่อแสดงผลและคำนวณค่า Magnetic Flux, แรงดันไฟฟ้าขาออกได้แบบ Real time โดยจะกำหนดค่าใน Block ตาม Output ที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากสมการ

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

โดยที่ $V_q = 1.65 \text{ V}$
 $Sensitivity(25^\circ\text{C}) = 30 \text{ mV/mT}$
 $S_{TC} = 0.12 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 34 ภาพแสดง Simulink Setup เพื่อเก็บค่า Magnetic Flux, แรงดันไฟฟ้าขาออก และ Raw Bit

3. ทำการเก็บข้อมูลค่า Raw bit, Magnetic Flux และแรงดันไฟฟ้าขาออก จากเซนเซอร์ โดยเริ่มที่ระยะ 4.5 cm ไปจนถึง 0.0 cm และเก็บค่าในแต่ละระยะเป็นเวลา 3 วินาทีต่อรอบ โดยทำซ้ำรอบละ 3 ครั้ง หลังจากนั้นทำการปรับระยะที่ละ 0.5 cm ทั้งแบบมี Shield และไม่มี Shield
4. นำข้อมูล Excel ที่ได้จาก MATLAB ของแต่ละระยะทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำ

time	VOLT	B(Tesla)	RAW	AVG
0	0.0531861	-0.053227	66	VOLT 0.051744
0.2	0.053996	-0.053213	67.00502	B(Tesla) -0.053274
0.4	0.053181	-0.053218	65.99326	RAW 64.21047
0.6	0.052569	-0.053225	65.23363	
0.8	0.052530	-0.053230	65.18596	
1	0.052367	-0.053234	64.98330	
1.2	0.052132	-0.053238	64.69135	
1.4	0.052060	-0.053241	64.60186	
1.6	0.052004	-0.053244	64.53227	
1.8	0.051706	-0.053248	64.16285	
2	0.051308	-0.053252	63.66956	
2.2	0.051332	-0.053255	63.69865	
2.4	0.051417	-0.053257	63.80490	
2.6	0.051552	-0.053259	63.97214	
2.8	0.051554	-0.053261	63.97413	
3	0.051555	-0.053262	63.97587	
3.2	0.051556	-0.053263	63.97741	
3.4	0.051557	-0.053264	63.97877	
3.6	0.051651	-0.053265	64.09505	
3.8	0.051691	-0.053266	64.14474	
4	0.051812	-0.053266	64.29480	
4.2	0.051597	-0.053267	64.02789	
4.4	0.051596	-0.053267	64.02654	
4.6	0.051520	-0.053268	63.93198	
4.8	0.051522	-0.053268	63.93504	
5	0.051525	-0.053268	63.93787	

รูปที่ 35 ตารางการหาค่าเฉลี่ยของ Raw Bit, Magnetic Flux และ แรงดันไฟฟ้าขาออก 1 รอบ

5. จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากระยะทั้ง 3 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ค่ามีความแม่นยำที่สุด

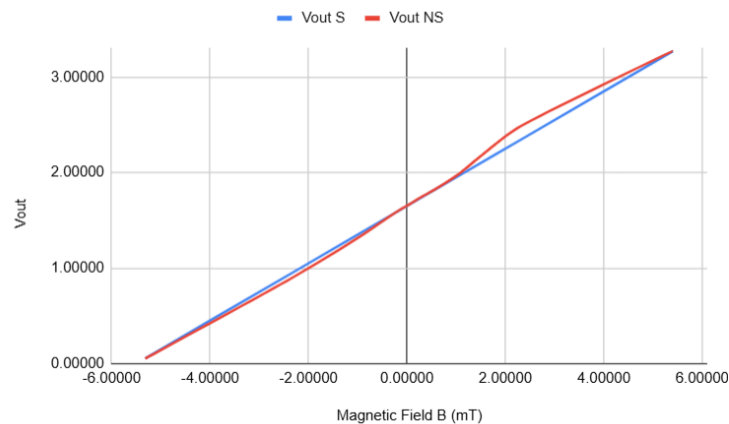
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	4.5 cm
1	-0.000289	-0.000361	0.00168	0.00158		
2	-0.000282	-0.000370	0.00167	0.00157		
3	-0.000314	-0.000388	0.00165	0.00158		
B_MEAN	-0.00030	-0.000373	0.00167	0.00158		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	4.0 cm
1	-0.001046	-0.001130	0.00241	0.00222		
2	-0.001027	-0.001142	0.00245	0.00226		
3	-0.001032	-0.001158	0.00246	0.00224		
B_MEAN	-0.00103	-0.001143	0.00244	0.00224		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	3.5 cm
1	-0.002266	-0.002272	0.00377	0.00359		
2	-0.002298	-0.002280	0.00376	0.00364		
3	-0.002291	-0.002286	0.00378	0.00360		
B_MEAN	-0.00228	-0.002279	0.00377	0.00361		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	3.0 cm
1	-0.004748	-0.004444	0.00587	0.00583		
2	-0.004773	-0.004434	0.00587	0.00580		
3	-0.004747	-0.004413	0.00586	0.00583		

ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	4.5 cm
1	1.64	1.64	1.70	1.70		
2	1.64	1.64	1.70	1.70		
3	1.64	1.64	1.70	1.70		
V_MEAN	1.64	1.64	1.70	1.70		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	4.0 cm
1	1.62	1.62	1.72	1.72		
2	1.62	1.62	1.72	1.72		
3	1.62	1.61	1.72	1.72		
V_MEAN	1.62	1.62	1.72	1.72		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	3.5 cm
1	1.58	1.58	1.76	1.76		
2	1.58	1.58	1.76	1.76		
3	1.58	1.58	1.76	1.76		
V_MEAN	1.58	1.58	1.76	1.76		
ROUND	N	NS	N S	S NS	S S	3.0 cm
1	1.51	1.52	1.82	1.82		
2	1.51	1.52	1.82	1.82		
3	1.51	1.52	1.82	1.82		

รูปที่ 36 รูปตารางการหาค่าเฉลี่ยสุดท้ายจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ของ Magnetic Flux และ แรงดันไฟฟ้าขาออก

6. หลังจากที่ได้ข้อมูลครบทุกระยะแล้ว ทั้งแบบมี Shield และไม่มี Shield จะนำข้อมูลทั้งหมดมาพล็อตกราฟโดยใช้ Excel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออก กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ผลการทดลอง



รูปที่ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออก กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของสนามแม่เหล็ก กับ แรงดันไฟฟ้าขาออก พบว่า เมื่อค่าของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทั้งในทิศทางบวกและลบ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น โดยมีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างกราฟของ แรงดันไฟฟ้าขาออก (มี Shield) และ แรงดันไฟฟ้าขาออก (ไม่มี Shield)

- ในช่วง **B** เป็นลบ (ขั้ว S เข้าใกล้เซนเซอร์) ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0 V ไปถึงราว 1.65 V
- ในช่วง **B** เป็นบวก (ขั้ว N เข้าใกล้เซนเซอร์) ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 1.65 V ต่อเนื่องจนถึงประมาณ 3.3 V

โดยรวมแล้วผลการทดลองยืนยันว่าแรงดันขาออกของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็กแบบ **เชิงเส้น (Linear Relationship)** และสามารถใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองขั้ว

สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าขาออก (V) กับ สนามแม่เหล็ก (mT) โดย

- เส้น สีน้ำเงิน คือกรณี **ไม่มี Shield**
- เส้น สีแดง คือกรณี **มี Shield**

จากการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าขาออก ของ Magnetic Sensor เมื่อมีและไม่มีแผ่น Shield เพื่อเปรียบเทียบผลของการป้องกันสนามแม่เหล็ก พบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ เมื่อค่าของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันเอาต์พุตก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยทั้งในทิศทางบวกและทิศทางลบ กรณี **ไม่มี Shield (NS)** ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มแปรผันตามสนามแม่เหล็กได้ดีแต่จะมีความคลาดเคลื่อนและสัญญาณรบกวนเล็กน้อย ในขณะที่กรณี **มี Shield (S)** ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีความเรียบและคงที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่าแผ่น Shield สามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอกได้

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการมี Shield มีผลช่วยให้สัญญาณของ Magnetic Sensor มีความเสถียรและแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะในสภาวะแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กรบกวนหรือแหล่งกำเนิดสนามอื่นใกล้เคียง

อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic Sensor) ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก อย่างมีลักษณะเชิงเส้น โดยเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นทั้งในทิศทางบวกและลบ ค่าแรงดันเอาต์พุตก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กได้อย่างต่อเนื่องและมีความไวสูง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณี ไม่มี Shield (NS) และ มี Shield (S) พบว่าในกรณีไม่มี Shield ค่าแรงดันมีความผันผวนเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กภายนอกหรือสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ส่วนในกรณีที่มี Shield ค่าแรงดันมีความเรียบและเสถียรมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า แผ่น Shield สามารถลดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กรบกวนภายนอก ทำให้เซนเซอร์สามารถวัดค่าที่แท้จริงของสนามแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดได้แม่นยำขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของ Magnetic Shielding ซึ่งอธิบายว่า แผ่นโลหะที่มีค่าความนำแม่เหล็กสูง (เช่น เหล็กอ่อน) จะช่วยดูดซับและกระจายเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กภายนอกไม่สามารถเข้ามารบกวนบริเวณที่ต้องการป้องกันได้โดยตรง

กล่าวโดยสรุป การใช้แผ่น Shield มีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานเซนเซอร์แม่เหล็กในสภาพแวดล้อมจริง โดยเฉพาะในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กหลายทิศทางหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาจสร้างสัญญาณรบกวน ส่งผลให้การวัดมีความเสถียร เพียงตรง และสามารถนำไปใช้ในงานควบคุมหรือการวัดเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

- ควรทดลองซ้ำภายใต้สภาวะสนามแม่เหล็กรบกวนเพื่อทดสอบว่า Shield สามารถช่วยดูดซับสนามแม่เหล็กได้เท่าไร
- ควรทดลองซ้ำให้มากกว่านี้ เพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

อ้างอิง

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

1.4 หัวข้อ LAB : Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

การทดลองที่ 1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของ Load Cell

จุดประสงค์

1. เพื่อเข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานและพฤติกรรมของ Load Cell
2. เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำระหว่าง Load Cell ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานและแรงดันไฟฟ้า
3. เพื่อเข้าใจการนำข้อมูลดิบจากเซนเซอร์มาแปลงเป็นข้อมูลที่สามารถพิสูจน์พฤติกรรมของ Load Cell และสามารถ Linearization ข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูลให้ง่ายต่อการใช้งาน

สมมติฐาน

ถ้ามีการเพิ่มน้ำหนักให้กับ Load Cell แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า แล้วพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกับแรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:

- น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปวางที่ Load Cell

2. ตัวแปรตาม:

- แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักที่วางได้ใน Load Cell

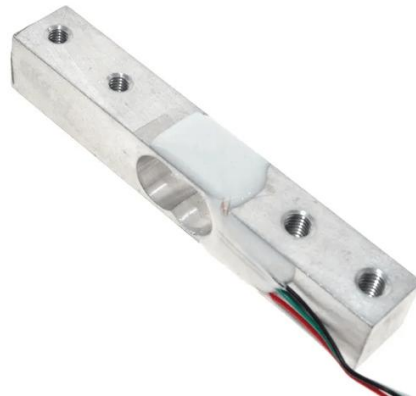
3. ตัวแปรควบคุม:

- เวลาในการเก็บข้อมูลของ Load Cell
- ความถี่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของ Load Cell
- ประเภทของ Load Cell
- น้ำหนักในถุงทราย
- อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โหลดเซลล์รุ่น YZC-131A เป็นโหลดเซลล์แบบ Strain Gauge ชนิด *Single-Point* ที่ใช้หลักการแปลงแรงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยเมื่อมีแรงกดหรือแรงดึงมากระทำ ตัวเซนเซอร์ภายในจะเกิดการยืดหรือหดตัว ส่งผลให้ค่าความต้านทานของเกจเปลี่ยนไปและให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับ $1.0 \pm 0.15 \text{ mV/V}$ ซึ่งจำเป็นต้องผ่านวงจรขยายสัญญาณก่อนนำไปประมวลผล เช่น โมดูล INA125 ในงานทดลองระบบวัดน้ำหนัก

ตัวเซนเซอร์ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอย มีช่วงการวัดให้เลือกตั้งแต่ 0.5 กก. ถึง 10 กก. รองรับแรงเกินพิกัดได้ 120–150 % ของค่าพิกัด มีความไม่เป็นเชิงเส้น 0.05 % FS และค่าฮิสเทอรีซิส 0.03 % FS ให้ความแม่นยำและความเสถียรที่เหมาะสมสำหรับการทดลองหรือระบบชั่งน้ำหนักขนาดเล็ก โดยสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -10 °C ถึง +40 °C โหลดเซลล์รุ่นนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาการแปลงแรงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า การเทียบ (Calibration) และการประยุกต์ใช้ในระบบวัดแรงหรือวัดน้ำหนักแบบอัตโนมัติ.



รูปที่ 38 ภาพ Single Point Load Cell YZC-131A

Strain Gauge เป็นเซนเซอร์พื้นฐานที่ทำหน้าที่แปลงความเครียด (Strain) ทางกลที่เกิดขึ้นบน Load Cell ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าตามหลักการที่ว่า ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด เมื่อ Load Cell ถูกกระทำด้วยแรงหรือน้ำหนัก ความเครียดจะทำให้ความต้านทานของ Strain Gauge เปลี่ยนไปในอัตราส่วนที่สัมพันธ์กัน โดยมีค่า **Gauge Factor (GF)** เป็นตัวกำหนดความไวของการเปลี่ยนแปลงนี้

$$GF = \frac{\frac{\nabla R}{R}}{\epsilon}$$

โดย

GF = Gauge Factor

∇R = ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (Ω)

R = ค่าความต้านทาน (Ω)

ϵ = ความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุ

เนื่องจาก ∇R เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก Strain Gauge จึงต้องถูกนำมาต่อเข้ากับวงจร **Wheatstone Bridge** ซึ่งจะแปลงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ให้เป็นสัญญาณแรงดันผลต่าง

Wheatstone Bridge เป็นวงจรพื้นฐานที่ประกอบด้วยตัวต้านทานสี่ตัวเรียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มีบทบาทสำคัญในระบบเซนเซอร์สมัยใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในปริมาณทางกายภาพ เช่น ความเครียด (Strain) ซึ่งเป็นหลักการทำงานของ Load Cell วงจรนี้ใช้เพื่อกำหนดค่าความ

ต้านทานที่ไม่ทราบค่าโดยเปรียบเทียบกับความต้านทานที่ทราบค่า โดยมีหลักการทำงานอยู่บนสถานะ สมดุล และ ไม่สมดุล ในสถานะสมดุล อัตราส่วนของความต้านทานทั้งสองคู่จะเท่ากัน ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต V_{out} เป็นศูนย์ $V_{out} = 0$ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานในขาใดขาหนึ่ง (เช่น เมื่อ Load Cell ถูกกระทำด้วยน้ำหนัก ทำให้ Strain Gauge เปลี่ยนความต้านทาน) วงจรจะเข้าสู่สถานะ ไม่สมดุล ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ $V_{out} \neq 0$ หรือดังสมการดังนี้ กรณีเป็น Wheatstone Full-bridge

$$V_{out} = (GF \cdot \epsilon)V_{EXC}$$

โดย

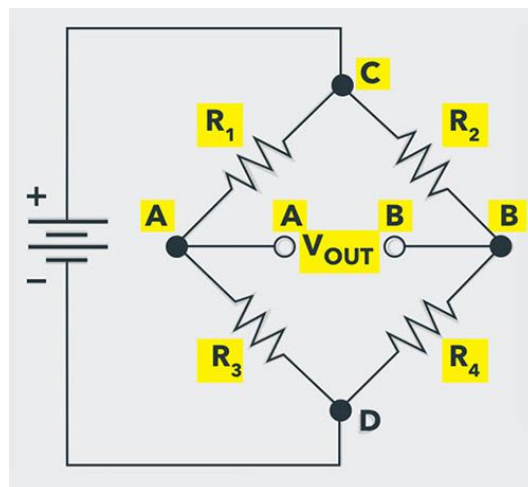
V_{out} = แรงดันขาออก (Volt)

GF = Gauge Factor

ϵ = ความเครียดจากวัสดุ

V_{EXC} = แรงดันขาเข้า Wheat stone bridge (Volt)

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน และสามารถใช้คำนวณหาค่าความเครียดหรือแรงกดที่กระทำต่อเซนเซอร์ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 39 ภาพวงจร Wheatstone Bridge

เครื่องขยายสัญญาณวัด INA125 (Instrumentation Amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการขยายสัญญาณที่มีความแม่นยำสูง โดยหัวใจหลักในการควบคุมการขยายสัญญาณคือ ค่า Gain ซึ่งถูกกำหนดโดย ตัวต้านทานภายนอก R_G เพียงตัวเดียวตามสูตร

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

โดย

G = กำลังขยายของ Amplifier

R_G = ความต้านทานภายนอก (Ω)

ซึ่งแสดงให้เห็นถึง **ความสัมพันธ์แบบผกผัน** กล่าวคือ การใช้ค่า ความต้านทานภายนอก R_G ที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้ค่า Gain เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่า Gain ที่ถูกกำหนดนี้จะส่งผลโดยตรงต่อ แรงดันเอาต์พุต V_{out} ของวงจร ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

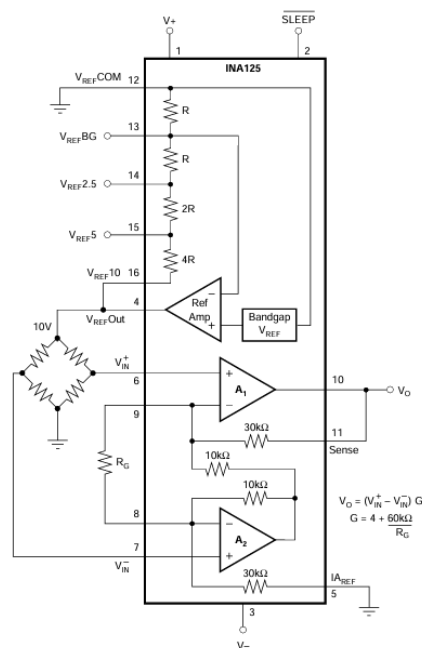
$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-)G$$

โดย

$(V_{in}^+ - V_{in}^-)$ คือ ผลต่างแรงดัน Input (Volt)

V_{out} = แรงดัน output

ดังนั้น เมื่อ ค่า Gain มีค่าสูงขึ้น มันจะทำหน้าที่เป็นตัวปรับความไว (Sensitivity) ที่ทำให้แรงดันผลต่างอินพุต $(V_{in}^+ - V_{in}^-)$ ที่มาจาก Load Cell ถูกขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามสัดส่วน ส่งผลให้ V_{out} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 40 ภาพ Amplifier รุ่น INA125

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ V_{supply} ให้กับ Load Cell จากนั้นเชื่อมต่อขา A+ และ A- เข้าขา IN ของ Comparator และเชื่อมต่อขา Output จาก Comparator เข้าขา A0 บนไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ทำการหาค่า G ที่เหมาะสม ที่ทำให้ Comparator Saturation ที่ 10 KG พอดี โดยเริ่มจากการชั่งน้ำหนัก 10 KG ที่ Load Cell และวัด V_{IN}^+ เทียบกับ V_{IN}^- จากนั้นคำนวณค่า G จากสมการ

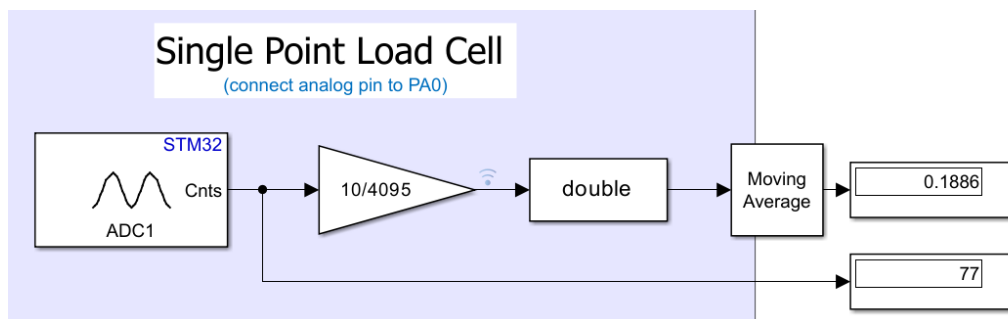
$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-)G$$

โดยที่ $V_O = V_{cc}$

3. จากนั้นนำค่า G ที่คำนวณได้มา หาค่า R_G จากสมการ

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

4. ทำการปรับค่า Trim pot ตามที่คำนวณ R_G ไว้
5. ทำการ Setup Simulink โดยใช้ Block Gain ทำการเทียบสัญญาณไตรยางค์ เพื่อแสดงค่าน้ำหนักในหน่วย kg แบบ Real-time และใช้ Block Moving Average เพื่อหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทำ Signal Conditioning



รูปที่ 41 ภาพการ Setup Simulink เพื่อแสดงผลค่าน้ำหนักแบบ Real-time

6. ทำการเก็บค่าน้ำหนักโดยเริ่มจาก 0.0 kg และเพิ่มน้ำหนักทีละ 0.5 kg จนถึง 10.0 kg โดยจะใช้ตุ้มน้ำหนัก 1 ถุง แทนน้ำหนัก 0.5 kg ซึ่งต้องนำตุ้มน้ำหนักไปชั่งกับเครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อหาน้ำหนักจริงของตุ้มน้ำหนักก่อนที่จะนำตุ้มน้ำหนักไปชั่งด้วย Load Cell โดยทำการเก็บค่าซ้ำทั้งหมด 3 รอบ รอบละ 3 วินาที
7. นำค่าทั้ง 3 ครั้ง ของทุกน้ำหนักมาหาค่าเฉลี่ยสุดท้ายอีกครั้งหนึ่งเพื่อได้ค่าที่แม่นยำที่สุด

Weight	bit_mean	1	2	3
0	68.00	68	68	68
0.5	220.67	222	220	220
1	409.33	412	408	408
1.5	544.00	544	542	546
2	707.50	721	704.5	697
2.5	888.00	888	888	888
3	1039.67	1040	1040	1039
3.5	1294.33	1295	1293	1295
4	1418.00	1418	1418	1418
4.5	1534.33	1534	1536	1533
5	1791.00	1786	1791	1796
5.5	1967.33	1967	1967	1968
6	2059.00	2058	2058	2061
6.5	2138.00	2163	2123	2128
7	2409.67	2410	2410	2409
7.5	2768.67	2767	2768	2771
8	2994.67	2995	2995	2994
8.5	3071.67	3068	3073	3074
9	3100.67	3100	3101	3101
9.5	3118.67	3119	3119	3118
10	3121.67	3121	3122	3122

KG

รูปที่ 42 ภาพการหาค่าเฉลี่ยสุดท้ายจากทั้ง 3 ครั้ง

- เมื่อได้ค่าต่าง ๆ เก็บค่าครบทุกน้ำหนักแล้ว ต้องลบ Offset ค่า 0.0 kg ออกจากทุกน้ำหนัก

Weight (kg)	Real_weight	bit_weight	Vout(meas)	Vout(bit)	(VIN+ - VII Gain	
0	0	0.000	0.15	0.056	0	0
0.5	0.5	0.489	0.23	0.181	0.2	904.82
1	1.006	1.093	0.38	0.336	0.4	839.21
1.5	1.524	1.525	0.49	0.446	0.6	743.53
2	2.023	2.048	0.64	0.580	0.8	725.25
2.5	2.527	2.627	0.78	0.728	1	728.23
3	3.007	3.112	0.93	0.853	1.2	710.50
3.5	3.504	3.928	1.06	1.061	1.4	758.18
4	3.985	4.324	1.19	1.163	1.6	726.79
4.5	4.487	4.697	1.27	1.258	1.7	740.16
5	4.979	5.519	1.49	1.469	1.9	773.03
5.5	5.478	6.084	1.62	1.613	2.1	768.27
6	5.965	6.378	1.71	1.689	2.4	703.56
6.5	6.452	6.631	1.86	1.753	2.6	674.35
7	7.1	7.234	1.99	1.976	2.8	705.75
7.5	7.476	7.590	2.13	2.271	3	756.84
8	8.02	8.161	2.46	2.456	3.3	744.20
8.5	8.496	8.634	2.54	2.519	3.5	719.71
9	8.995	9.127	2.55	2.543	3.7	687.24
9.5	9.493	9.673	2.55	2.558	3.9	655.78
10	9.97	10.000	2.56	2.560	4	640.00

KG

KG

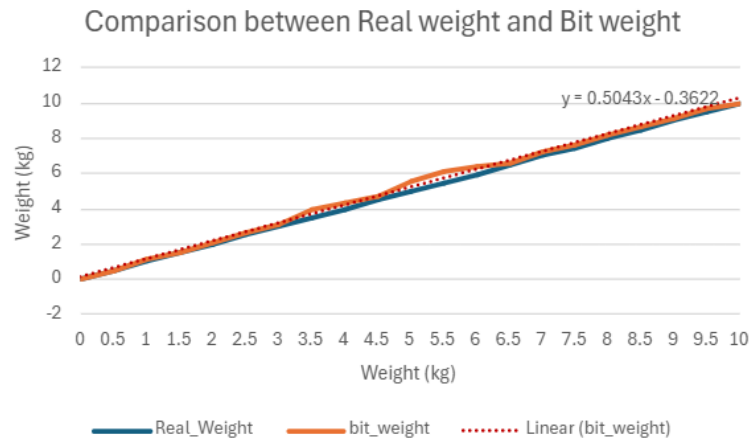
V

mV

รูปที่ 43 ภาพตารางสรุปค่าสุดท้ายก่อนนำไปพล็อตกราฟ

- นำค่าน้ำหนักจริง กับน้ำหนักที่วัดได้จาก Load Cell Sensor ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์
- นำกราฟที่ได้มาทำ Linearization จากการใช้ฟังก์ชัน Trendline ในโปรแกรม Excel และหาสมการเชิงเส้น (Linear Equation)

ผลการทดลอง



รูปที่ 44 ภาพกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริง กับน้ำหนักที่วัดได้จาก Load Cell

จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงกับค่าน้ำหนักที่วัดได้จาก Load Cell รุ่น YZC-131A พบว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่วางบน Load Cell ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) จะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (Linear Relationship) ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า “แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนัก”

สรุปผลการทดลอง

จากกราฟที่ได้ (รูปที่ 6) แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (Linear Relationship) และค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุดมีน้อย แสดงว่าโหลดเซลล์มีความแม่นยำและเสถียรในการวัด

ซึ่งถ้าเมื่อเทียบค่าน้ำหนักที่วัดได้จากเซนเซอร์กับน้ำหนักจริง พบว่ายังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ แต่โดยเฉลี่ยค่ามีความค่อนข้างต่ำ (ไม่เกิน 200 g) ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น การสั่นสะเทือนของฐานรองหรือค่าความต้านทานภายในวงจรขยาย (INA125) หรือจากตำแหน่งการวางน้ำหนักบน Load Cell หรือจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยก็สามารถส่งผลได้ แต่โดยรวมแล้วผลการทดลองยืนยันได้ว่า Load Cell สามารถแปลงน้ำหนักเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างแรงที่กระทำกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out})

อภิปรายผล

จากสรุปผลการทดลองที่กล่าวมาทำให้ทราบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อใส่ น้ำหนักเข้าไปใน Load Cell จากคุณสมบัติพื้นฐานของ Load Cell ถ้า Load Cell เกิดการกดลง หรือดันขึ้น จะ ส่งผลให้เกิดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงออกมา เนื่องจาก ใน Load Cell มี Strain gauge และมีการต่อวงจรแบบ Wheatstone Bridge เนื่องจากแรงดันที่ออกมาจาก Load cell มีค่าน้อยมากในระดับมิลลิโวลต์ จึงจำเป็นต้องเข้า Amplifier รุ่น INA125 เพื่อขยายสัญญาณโดยจากกระบวนการทดลองได้ปรับตัวต้านทานภายนอกให้มีค่าคงที่ เพื่อได้ค่ากำลังขยายสัญญาณได้ตามสมการ

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

หลังจากนั้น Amplifier สามารถขยายสัญญาณให้สามารถนำไปใช้จริงได้เนื่องจากข้างใน Amplifier มี Op-Amp เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณให้ใหญ่และแม่นยำจากสมการดังนี้

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

โดยสรุป เมื่อนำน้ำหนักมาชั่งกับ Load cell ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงมาก เกิด Gauge Factor มาก ส่งผลให้เกิดแรงดันขาออกที่มากดังสรุปผลการทดลองที่กล่าวมา

ข้อเสนอแนะ

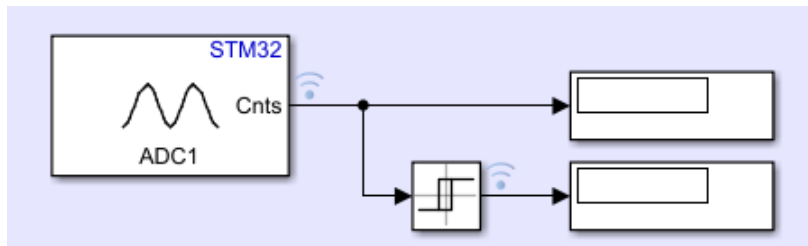
- ควรทดลองในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

อ้างอิง

- [YZC-131 10kg Range Weighing <https://www.datasheethub.com/yzc-131-10kg-range-weighing-sensor-load-cell-sensor/Sensor Load Cell Sensor - Datasheet Hub>](https://www.datasheethub.com/yzc-131-10kg-range-weighing-sensor-load-cell-sensor/Sensor Load Cell Sensor - Datasheet Hub)
- [Load cell YZC-<https://www.datasheethub.com/wp-content/uploads/2022/10/YZC-131A.pdf>](https://www.datasheethub.com/wp-content/uploads/2022/10/YZC-131A.pdf)
- <https://www.micro-tess.com/th/wheatstone-bridge/>
- [Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference datasheet](#)
- <https://www.botasys.com/post/strain-gauge-load-cell>

ภาคผนวก ก

รูปภาพประกอบกระบวนการทดลองและผลลัพธ์การทดลอง Potentiometer

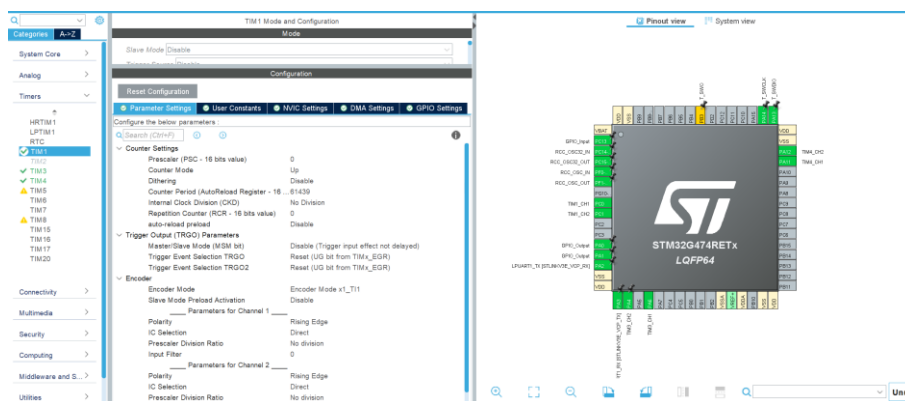


รูปที่ 45 แสดงการจำลองวงจร Schmitt Trigger ด้วย Simulink

หลักการทำงานของโปรแกรมคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่ามาจาก Potentiometer ซึ่งเป็นสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog Signal) จากนั้นข้อมูลจะถูกแปลงเป็น 12-bit ADC จากนั้นค่า 12-bit ADC จะผ่าน Block Relay ที่ถูกกำหนดเงื่อนไข Upper Threshold ที่ 80% ของค่า ADC และค่า Lower Threshold ที่ 20% ของค่า ADC ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจาก Block Relay เป็นเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital) ซึ่งเมื่อค่า ADC สูงกว่า Upper Threshold จะได้สัญญาณเอาต์พุตแบบ High และเมื่อค่า ADC ต่ำกว่า Lower Threshold จะได้สัญญาณเอาต์พุตแบบ Low

ภาคผนวก ข

รูปภาพประกอบกระบวนการทดลองและผลลัพธ์การทดลอง Incremental Encoder



รูปที่ 46 แสดงการตั้งค่า IOC

เปิด CubeMX ไปยัง Timers และเลือก TIM1, TIM3, TIM4 ตั้งค่า mode Combined Channels เป็น Encoder Mode และปรับ Counter Period เป็น 61439 ในช่อง Configuration (สามารถตั้งเป็นค่าอื่นได้ ตราบใดที่ไม่เกิน 2^{16}) ปรับ Encoder Mode ในช่อง Configuration ของแต่ละ TIM เป็นดังนี้

- TIM1 เป็น Encoder Mode x1_TI1 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X1

- TIM3 เป็น Encoder Mode TI1 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X2
- TIM4 เป็น Encoder Mode TI1 and TI2 เพื่อปรับ Mode Encoder เป็น X4

```

1 function pos_unwrapped=WrapAround_HomeOnPA5(count,period,btnPc13)
2 %Inputs:
3 %count : ค่าจากตัวนับของ TIMx encoder
4 %period : คาบของบิตของเคาน์เตอร์ (61439) + โนลส์ = period + 1
5 %btnPc13 : สัญญาณเป็น 1 = กด, 0 = ไม่กด เพื่อ set home
6 %Output:
7 %pos_unwrapped : ตำแหน่งสะสมแบบต่อเนื่อง (รีเซ็ตเป็นศูนย์เมื่อโฮม)
8
9 persistent prevCount pos
10 persistent stableBtn prevStable
11 persistent cnt
12
13 if isempty(prevCount)
14 % ตรวจสอบฟังก์ชันเพื่อเริ่มทำงาน (ยังไม่มีค่าเก่า)
15 prevCount=double(count); % ตั้งค่า count เริ่มต้น
16 pos=0.0; % เริ่มตำแหน่งที่ 0
17 stableBtn=false; % สถานะปุ่มเริ่มต้น = ไม่กด
18 prevStable=false; % สถานะก่อนหน้าเริ่มต้น = ไม่กด
19 cnt=uint16(0); % ตัวนับตัวนับเริ่มต้น = 0
20 end
21
22 M=double(period)+1.0; % โนลส์สริงของเคาน์เตอร์ (เช่น 61439+1=61440)
23 half=floor(M/2.0); % ครึ่งหนึ่งของโนลส์ ใช้สำหรับตรวจสอบ overflow
24 d=double(count)-prevCount; % ความแตกต่างของ count ระหว่างรอบนี้กับรอบก่อน
25
26 if d>half
27 d=d-M; % ถ้าค่าที่วัดได้มากกว่าครึ่งหนึ่ง → ถือว่า wrap จากสูงสุดไปต่ำสุด
28 elseif d<-half
29 d=d+M; % ถ้าค่าที่วัดได้ต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง → ถือว่า wrap จากต่ำสุดไปสูงสุด
30 end
31
32 pos=pos+d; % สะสมตำแหน่งแบบต่อเนื่อง (รวมระยะที่เปลี่ยน)
33 prevCount=double(count); % เก็บค่า count ปัจจุบันไว้เป็นค่าเดิมสำหรับรอบถัดไป

```

รูปที่ 47 แสดง Function Wrap around และใน block MATLAB Function

หลักการการทำงานของ Function คือ จะมีการกำหนดตัวแปร M คือตัวแปรที่นำค่า period สูงสุดของ Encoder ไป +1 เพื่อใช้ในการคำนวณ เมื่อ Function นี้รับค่ามาจาก Encoder แล้วการเปลี่ยนแปลงของค่าที่รับมา (ตัวแปร d) มากกว่าครึ่งหนึ่งของ M จะทำให้โปรแกรมเข้าใจว่าเกิดการ Underflow ของข้อมูล ทำให้เข้าเงื่อนไข โดยในเงื่อนไขจะมีตัวแปร d เป็นตัวแปรที่เอาค่าปัจจุบันไปลบค่าก่อนหน้า เมื่อถูกเช็คค่า d มากกว่าครึ่งหนึ่งของค่า M ค่า d จะถูกนำไปลบกับค่า M เพื่อหาค่าเปลี่ยนแปลงที่แท้จริง จากนั้น จะนำค่า d ไปบวกกับค่า pos เพื่อเก็บค่าอย่างต่อเนื่อง ส่วนในกรณี Overflow จะต่างกันว่า ค่า d จะถูกนำไปบวกกับค่า M แทน

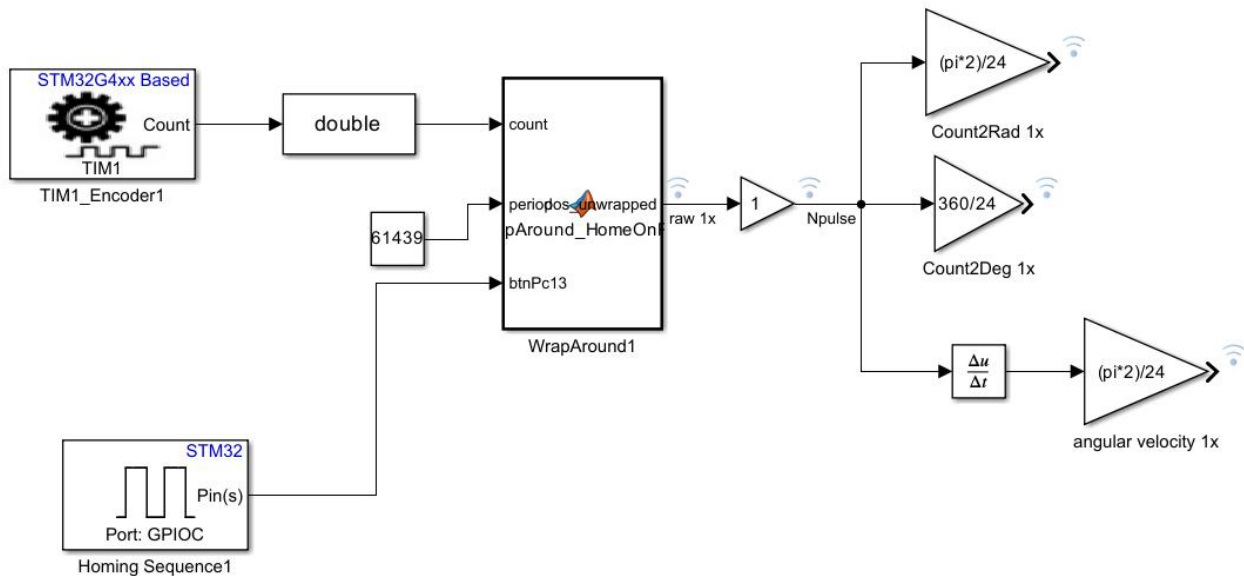
```

35 %----- HOMING SEQUENCE -----%
36 N=uint16(5); % จำนวน sample ที่ใช้ตัวนับปุ่ม (5 sample → ~5 ms)
37 raw=(btnPc13~=0); % อ่านค่าปุ่ม → true ถ้ากด (แปลงเป็น boolean)
38
39 if raw==stableBtn
40 cnt=uint16(0); % ถ้าสถานะปุ่มไม่เปลี่ยน → รีเซ็ตตัวนับตัวนับ
41 else
42 if cnt<N
43 cnt=cnt+1; % ถ้ากำลังเปลี่ยนสถานะ → เพิ่มตัวนับ
44 end
45 if cnt==N
46 stableBtn=raw; % ถ้าค่าที่ครบ N sample → ยอมรับสถานะใหม่
47 cnt=uint16(0); % รีเซ็ตตัวนับหลังจากยืนยันสถานะใหม่
48 end
49 end
50
51 rising=(stableBtn==true)&&(prevStable==false);
52 % ตรวจสอบขาขึ้น (จากไม่กด → กด)
53
54 prevStable=stableBtn; % เก็บสถานะปุ่มไว้เป็นค่าก่อนหน้าในรอบถัดไป
55
56 if rising
57 pos=0.0; % ถ้ามีขาขึ้น → รีเซ็ตตำแหน่ง = 0 (Home)
58 end
59
60 pos_unwrapped=-pos; % สัญญาณเอาต์พุต (กลับขั้วทิศทาง)
61 end

```

รูปที่ 48 แสดง Function Homing Sequence และใน block MATLAB Function

หลักการทำงานของ Function คือการตรวจนับค่าการกดปุ่ม PC13 เทียบกับ ตัวแปร Boolean stableBtn ถ้าไม่กดปุ่มจะไม่เกิดอะไรขึ้นถ้ากดปุ่มแล้วถ้ากดเกิน 5 sample จะทำให้ stableBtn เป็น true ทำให้ Rising Edge เป็นจริงทำให้ pos = 0.0 เป็นการ Reset ค่า pos_unwrapped



รูปที่ 49 แสดงการแปลงค่า Counts เป็น Degree Radian และ Angular Velocity ด้วย Simulink

ของ Decoder BOURNS PEC11R-4220F-N0024 แบบ X1

เริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่ามาจาก Encoder ซึ่งเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Signal) เป็นจำนวนพัลส์ (n_{pulse}) แล้วแปลงค่าที่ได้จาก Encoder ให้เป็นชนิดข้อมูลแบบ double เพื่อให้สามารถนำไปคำนวณภายในบล็อก MATLAB Function ได้อย่างถูกต้อง หลังจากผ่านการประมวลผลใน MATLAB Function แล้ว จะได้ค่าผลลัพธ์เป็น ค่า Count ค่าดังกล่าวจะถูกนำไปปรับ สเกล (Scale) โดยการหารออกตาม โหมดการนับของสัญญาณ X1, X2 หรือ X4 โดยใช้บล็อก Gain เพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับจำนวนพัลส์จริง (n_{pulse}) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา

มุมเชิงเรเดียน (Radian) ด้วยสมการ

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

อัตราการหมุนเชิงมุม (Angular Velocity) ด้วยสมการ

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

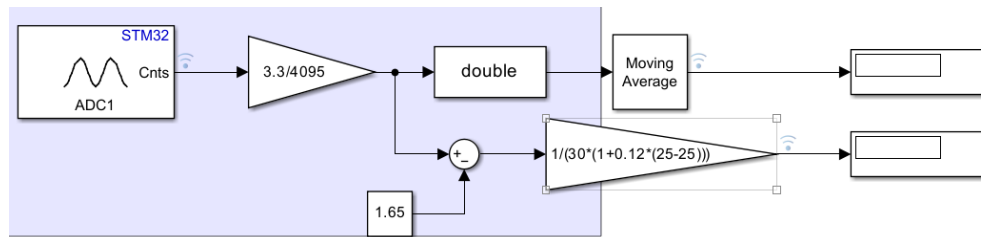
การหา Resolution ด้วยสมการ

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

โดยใช้ Block Gain และ Block Derivative

ภาคผนวก ค

รูปภาพประกอบกระบวนการทดลองและผลลัพธ์การทดลอง Magnetic Sensor



รูปที่ 50 ภาพแสดง Simulink Setup เพื่อเก็บค่า Magnetic Flux, แรงดันไฟฟ้าขาออก และ Raw Bit

หลักการทำงานของโปรแกรมคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่ามาจาก Magnetic Sensor ซึ่งเป็นสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog Signal) จากนั้นข้อมูลจะถูกแปลงเป็น 12-bit ADC จากนั้น Block Gain จะทำหน้าที่เทียบสัญญาณไตรยางค์เพื่อให้แสดงผลแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบ Real-time จากนั้น นำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปหาค่า B จากสมการ

$$B = (V_{out} - V_q) / \left(Sensitivity(25^{\circ}C) \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25^{\circ}C)) \right)$$

โดยที่ $V_q = 1.65 \text{ V}$

$Sensitivity(25^{\circ}C) = 30 \text{ mV/mT}$

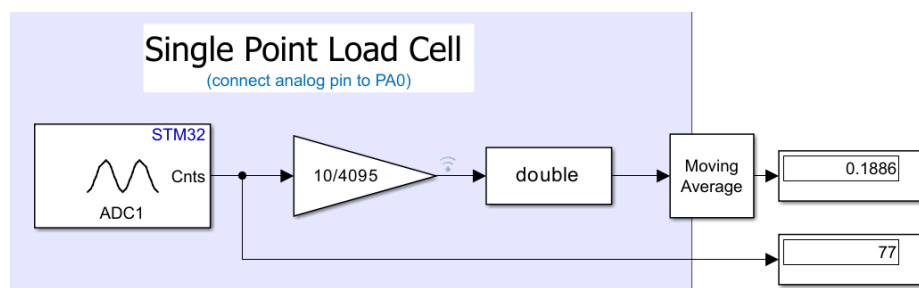
$S_{TC} = 0.12 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

$T_A = 25^{\circ}C$

จากนั้นค่าที่ออกมาที่ Display จะเป็นการแสดงผลค่า B และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต แบบ Real-time

ภาคผนวก ง

รูปภาพประกอบกระบวนการทดลองและผลลัพธ์การทดลอง Load Cell



รูปที่ 51 ภาพการ Setup Simulink เพื่อแสดงผลค่าน้ำหนักแบบ Real-time

หลักการทำงานของโปรแกรมคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่ามาจาก Load Cell ที่ถูกขยายสัญญาณจาก Instrumentation Amplifier (INA125) เป็นสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog Signal) จากนั้นข้อมูลจะถูกแปลงเป็น 12-bit ADC จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไป Block Gain เพื่อทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ และเข้า Block Moving Average เพื่อกรองสัญญาณให้มีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ออกมาเป็นน้ำหนักที่แสดงผลแบบ Real-time ในหน่วย kg