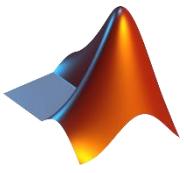


RMXplorer



LAB1: Sensors Report

Name

- นายฉันท์ชัย ออรุ่งโรจน์ 66340500011
- นายพงษ์ณัฐ อารยางกูร 66340500032
- นายภาคนิค อินทริวิเชียร 66340500039

Objectives

- เพื่อให้สามารถระบุชนิดและอธิบายหลักการทำงานของ Potentiometer ได้ รวมถึงการตอบสนองของ แรงดันไฟฟ้าตามระดับทางหรือองศาการหมุนของ Potentiometer ในชุดการทดลอง
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานและลักษณะของสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder ได้อย่างละเอียด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลง
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานและลักษณะสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ได้อย่างละเอียด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อ Magnetic Flux Density เปลี่ยนแปลงไป
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Load Cell, วงจร Wheatstone bridge, Strain Gauge, และ 2 Op-amps Differential Amplifier ได้ รวมถึงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อ Load Cell และ สัญญาณ Output ที่ได้จากการ
- เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการเขียนโปรแกรมเพื่อแปลงสัญญาณและอ่านค่าจาก อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Potentiometer, Incremental Encoder, Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และ Load Cell พร้อมทั้งแสดงผลสัญญาณ Output แบบ Real-Time โดยวิเคราะห์และแสดงผลตัว ประทักษิณภาพ เช่น แรงดันไฟฟ้า, ตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position), ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity), การเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration), ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) และน้ำหนัก ในหน่วย SI

Potentiometer

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของ Potentiometer
2. เพื่อศึกษาการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าจากอุกต่อระยะทาง หรือ องศาการหมุนของ Potentiometer
3. เพื่อศึกษาการแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตาม รูปแบบวงจร Schmitt-Trigger

สมมติฐาน

1. ชนิดของ Potentiometer ที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการใช้งานที่แตกต่างกันตามโครงสร้างทางกายภาพและวัสดุที่ใช้ในการผลิต
2. แรงดันไฟฟ้าจากอุกของ Potentiometer จะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงตามระยะทางหรือองศาการหมุนของแกนหมุน
3. การใช้งาน Schmitt-Trigger จะช่วยปรับปรุงการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ให้มีความเสถียรขึ้นโดยการลดสัญญาณรบกวนที่อยู่ข้างเคียงค่า Threshold ซึ่งจะส่งผลต่อการตอบสนองของการแปลงสัญญาณ

นิยามเชิงปฏิบัติการ

แรงดันขาเข้า	คือ แรงดันไฟฟ้า $3.3V$ จากแหล่งจ่ายบนบอร์ดทดลอง PotenXplorer
แรงดันขาออก	คือ แรงดันไฟฟ้าเมื่อวัดจากขาที่ 1 เทียบกับขา Wiper ของ Potentiometer มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt, V)
Taper	คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Potentiometer กับอัตราส่วนความต้านทาน
องศาการหมุน	คือ องศาที่เปลี่ยนไปของแกนหมุนบน Potentiometer มีหน่วยเป็นองศา (θ)
ระยะทาง	คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่ของแกนบน Potentiometer มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm.)
Nucleo-STM32	คือ Nucleo-STM32G474RE
PotenXplorer	คือ ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer, 3D-Print ใช้สำหรับ การวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทกเตอร์
บอร์ดทดลอง	คือ PotenXplorer
แผ่นเหล็ก	คือ แผ่นเหล็กที่มากับบอร์ดทดลอง PotenXplorer เพื่อเป็นเครื่องมือในการวัด Rotational Travel ของ Potentiometer
สายจัมเปอร์	คือ สายไฟฟ้า หรือกลุ่มสายในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อหรือพินที่ปลายแต่ละด้าน
Noise	คือ สัญญาณไฟฟ้าในวงจรที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากสัญญาณที่ได้ออกแบบการรบกวนทาง แม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า
Ground	คือ จุดอ้างอิงทางไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดัน $0V$
ขาที่ 1	คือ ขาซ้ายของ Potentiometer เมื่อหัน Potentiometer เข้าตัว
ขาที่ 2	คือ ขากลางของ Potentiometer เมื่อหัน Potentiometer เข้าตัว
ขาที่ 3	คือ ขาขวาของ Potentiometer เมื่อหัน Potentiometer เข้าตัว
ขา Wiper	คือ ขาของ Potentiometer ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนที่สามารถเคลื่อนที่และเปลี่ยนค่าความ ต้านทานของ Potentiometer ได้
แกนหมุน	คือ ก้านสำหรับการหมุนซึ่งเชื่อมต่อกับขา Wiper
แกนเลื่อน	คือ ก้านสำหรับการเคลื่อนที่ซึ่งเชื่อมต่อกับขา Wiper
Data Inspector	คือ Function ภายใน MATLAB ซึ่งสามารถแสดงค่าของสิ่งที่สนใจเทียบกับเวลาได้แบบ Real-Time
MATLAB	คือ แพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์
Simulink	คือ สภาพแวดล้อมแบบ Block Diagram สำหรับการออกแบบเดลล์ลารี่โดยมี
Schmitt-Trigger	วงจรที่ใช้ Op-Amp เพียงตัวเดียวและ Output ถูกกระตุ้นโดยระดับแรงดันไฟที่ แตกต่างกันสองระดับ ซึ่งมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital

นิยามเชิงปฏิบัติการ (ต่อ)

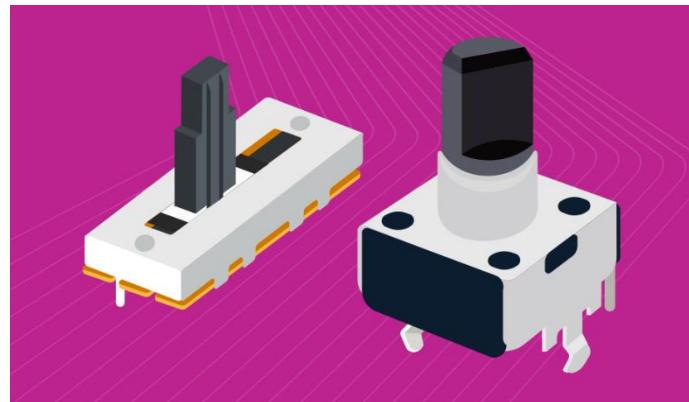
สายอัปโหลด	คือ สาย USB-A ถึง Micro-USB สำหรับส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และ Nucleo-STM32G474RE
Pin	คือ ช่องเขื่อมต่อบน Nucleo-STM32G474RE ซึ่งสามารถทำงานได้หลาย Function
Code	คือ ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์
.m	คือ นามสกุลไฟล์ MATLAB
.slx	คือ นามสกุลไฟล์ Simulink
Analog	คือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป มีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกัน
Digital	คือ สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอนซึ่งขนาดดังกล่าวอาจกระโดดไปมากระหว่างค่าสองค่า คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิตอลนี้เป็นสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการทำงานและติดต่อสื่อสารกันเป็นค่าของเลขลงตัว โดยปกติมักแทนด้วยระดับแรงดันที่แสดงสถานะเป็น "0" และ "1"

นิยามศัพท์เฉพาะ

Exponential	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบทวีคูณหรือเป็นกราฟเลขชี้กำลัง
Linear	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง
Hysteresis	คือ การที่ Output ไม่แปรผันตรงกันกับ Input

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Potentiometer คืออะไร

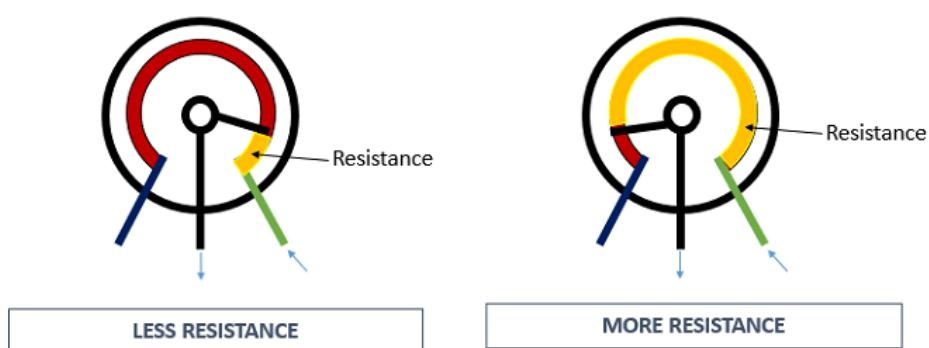


รูปที่ 1 Potentiometer

ที่มา: <https://www.sameskydevices.com/blog/all-you-need-to-know-about-potentiometers>

Potentiometer (โพเทนชิโอมิเตอร์) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า "Pots" เป็นตัวต้านทานที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ด้วยการหมุนหรือเลื่อน มีหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) ซึ่งช่วยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และทำหน้าที่วัดศักยไฟฟ้าได้ โพเทนชิโอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่มีความสำคัญในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า, วัดตำแหน่ง หรือควบคุมสัญญาณเสียงและแสง มีรูปแบบและคุณสมบัติที่หลากหลาย เพื่อตอบสนองการใช้งานที่แตกต่างกัน ทั้งในงานด้านอุตสาหกรรม การควบคุมอัตโนมัติ และงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป

2. หลักการทำงานของ Potentiometer



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Potentiometer

ที่มา: <https://randomnerdtutorials.com/electronics-basics-how-a-potentiometer-works/>

การทำงานของ Potentiometer เกิดจากการเลื่อนหรือหมุนขั้วเคลื่อนที่ (Wiper) ไปตามความยาวของตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานคงที่ ทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสได้ตามต้องการ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ออกมายจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของขั้วเคลื่อนที่นั้น ๆ ซึ่งการตอบสนองของค่าความต้านทานต่อระยะเวลา หรือองศาการหมุนของ Potentiometer จะขึ้นอยู่กับชนิดของ Taper ที่เลือกมาใช้

3. ประเภทของ Potentiometer

3.1 Rotary Potentiometer (แบบหมุน): ใช้การหมุนเพื่อปรับค่าความต้านทาน

3.2 Linear Potentiometer (แบบเลื่อน): ใช้การเลื่อนตัวเลื่อนตามเส้นตรงเพื่อปรับค่าความต้านทาน

3.3 Digital Potentiometer (ดิจิทัล): ใช้สัญญาณดิจิทัลในการควบคุมค่าความต้านทาน

4. ตัวอย่างการใช้งานของ Potentiometer

4.1 การควบคุมระดับเสียง: Potentiometer แบบ Logarithm ถูกออกแบบให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงแบบ Logarithmic เพื่อตอบสนองตามเสียงที่มนุษย์รับรู้โดยทั่วไป

4.2 การควบคุมความสว่างของแสง: ใช้ในการควบคุมความสว่างในอุปกรณ์ต่าง ๆ

4.3 การวัดตำแหน่ง: ใช้เป็นเซ็นเซอร์ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการการควบคุมความแม่นยำสูง

5. ตัวอย่างรูปแบบย่อยของ Potentiometer



รูปที่ 3 ชนิดต่าง ๆ ของ Potentiometer

ที่มา: <https://www.technophiles.com/types-of-potentiometer-applications/>

5.1 Trimmer Potentiometers

5.2 Dual Gang Potentiometers

5.3 Servo Potentiometers

6. การเลือก Potentiometer

การเลือก Potentiometer ให้เหมาะสมกับการใช้งานต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ค่าความต้านทาน, กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์สามารถรับได้, ความละเอียด (Resolution), และอายุการใช้งาน โดย Potentiometer บางรุ่นจะมีหลายรอบหมุน (Multi-Turn) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการปรับค่า

7. ข้อดีและข้อเสียของ Potentiometer

ข้อดี	ข้อเสีย
● การออกแบบที่เรียบง่าย	● ข้อจำกัดในการรองรับกำลังไฟสูง
● ราคาถูก	● ความแม่นยำในการควบคุมระยะไฟฟ้า
● ประยุกต์ใช้งานง่าย	● มีการสึกหรอนเนื่องจากกลไกภายใน
● มีให้เลือกหลายช่วงค่าความต้านทาน	● เกิด Noise ได้ในบางกรณี
● มีมาตรฐานและแพร่หลาย	

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของ Potentiometer

8. Datasheet และข้อมูลโดยคร่าวของ Potentiometer ที่ใช้ในการทดลอง

8.1 PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer



Features

- Carbon element
- Metal housing
- 15-60 mm travel
- Single and dual gang
- Center detent option
- RoHS compliant*



PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

Electrical Characteristics

- Taper Linear, audio
Standard Resistance Range 1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance $\pm 20\%$
Residual Resistance 500 ohms or 1 % max.
Insulation Resistance Min. 100 megohms at 250 V DC

Mechanical Characteristics

- Operating Force 30 to 250 gf
Stop Strength 5 kgf min.
Sliding Life 15,000 cycles
Soldering Condition 350 °C max. within 3 ± 0.5 seconds
Travel 15, 20, 30, 45, 60 mm

Environmental Characteristics

Operating Temperature	-10 °C to +50 °C
Power Rating, Linear	
15 mm	0.05 W (0.025 W Dual Gang)
20 mm	0.1 W (0.05 W)
30 mm	0.2 W (0.1 W)
45 mm	0.25 W (0.125 W)
60 mm	0.25 W (0.125 W)
Power Rating, Audio	
15 mm	0.025 W (0.015 W Dual Gang)
20 mm	0.05 W (0.025 W)
30 mm	0.1 W (0.05 W)
45 mm	0.125 W (0.06 W)
60 mm	0.125 W (0.06 W)
Maximum Operating Voltage, Linear	
15 mm	100 V DC
20-60 mm	200 V DC
Maximum Operating Voltage, Audio	
15 mm	50 V DC
20-60 mm	150 V DC
Withstand Voltage, Audio	
	1 Min. at 300 V AC
Sliding Noise	100 mV maximum
Tracking Error	3 dB at -40 to 0 dB

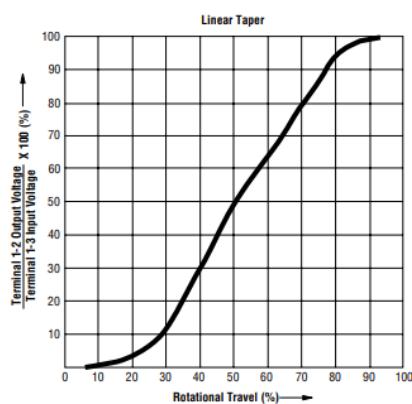
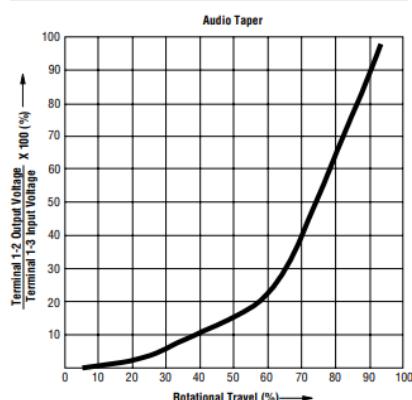
How To Order

PTA 15 4 3 - 2 0 10 DP B 203

Model _____
 Stroke Length
 • 15 = 15 mm
 • 20 = 20 mm
 • 30 = 30 mm
 • 45 = 45 mm
 • 60 = 60 mm
 Dust Cover Option
 • 4 = No Dust Cover
 No. of Gangs
 • 3 = Single Gang
 • 4 = Dual Gang
 Pin Style
 • 2 = PC Pins Down Facing
 Center Detent Option
 • 0 = No Detent
 • 2 = Center Detent
 Standard Lever Length
 (See Table)
 • 10 = 10 mm
 • 15 = 15 mm
 Lever Style
 • DP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CI = Insulated Lever
 (Refer to Drawing)
 Resistance Taper
 • A = Audio Taper
 • B = Linear Taper
 Resistance Code (See Table) _____

Other styles available.

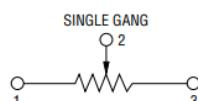
Tapers



Single Gang Dimensions

Model	A	B	C	D	E	Travel
PTA1543	<u>30</u> (1.18)	<u>26</u> (1.02)	<u>17.8</u> (.700)	<u>20.2</u> (.795)	<u>28.5</u> (1.12)	<u>15</u> (.59)
PTA2043	<u>35</u> (1.37)	<u>31</u> (1.22)	<u>22.8</u> (.897)	<u>25.2</u> (.992)	<u>33.5</u> (1.32)	<u>20</u> (.787)
PTA3043	<u>45</u> (1.77)	<u>41</u> (1.61)	<u>32.8</u> (1.29)	<u>35.2</u> (1.38)	<u>43.5</u> (1.71)	<u>30</u> (1.18)
PTA4543	<u>60</u> (2.36)	<u>56</u> (2.20)	<u>47.8</u> (1.88)	<u>50.2</u> (1.97)	<u>58.5</u> (2.30)	<u>45</u> (1.77)
PTA6043	<u>75</u> (2.95)	<u>71</u> (2.79)	<u>62.8</u> (2.47)	<u>65.2</u> (2.56)	<u>73.5</u> (2.89)	<u>60</u> (2.36)

Schematic



8.2 PDB18 Series - 17 mm Rotary Potentiometer



Features

- Single and dual section control
- Metal shaft styles
- Carbon element
- Center and multiple detent options
- Wide range of resistance tapers
- Plain or knurled shaft options

PDB18 Series - 17 mm Rotary Potentiometer

Electrical Characteristics

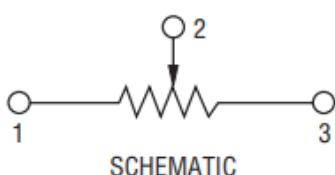
Taper..... Linear, audio
 Standard Resistance Range 1 K ohms to 1 M ohms
 Standard Resistance Tolerance..... $\pm 20\%$
 Residual Resistance..... 1 % max.

Environmental Characteristics

Operating Temperature ...-10 °C to +50 °C
 Power Rating
 Linear 0.2 watt
 Dual Section..... 0.125 watt
 Audio..... 0.1 watt
 Dual Section..... 0.06 watt
 Maximum Operating Voltage
 Linear 200 V
 Audio..... 150 V
 Sliding Noise 47 mV max.

Mechanical Characteristics

Mechanical Angle 300 ° ± 5 °
 Rotational Torque 10 to 150 gf-cm
 Detent Torque 150 to 500 g-cm
 Stop Strength 5 kg-cm min.
 Rotational Life 15,000 cycles
 Soldering Condition 260 °C max. within 3 seconds
 Hardware One flat washer and mounting nut supplied per potentiometer with bushing



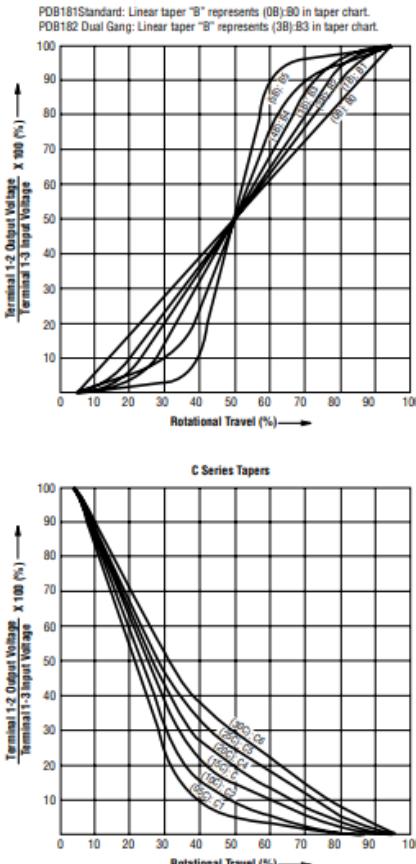
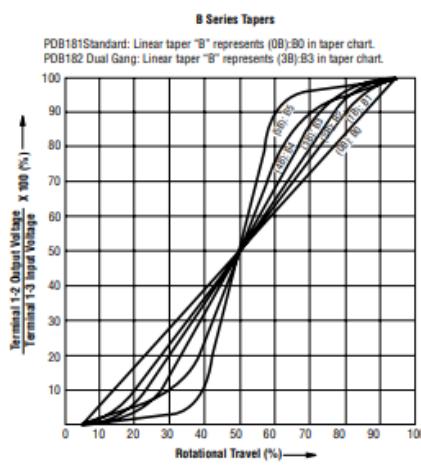
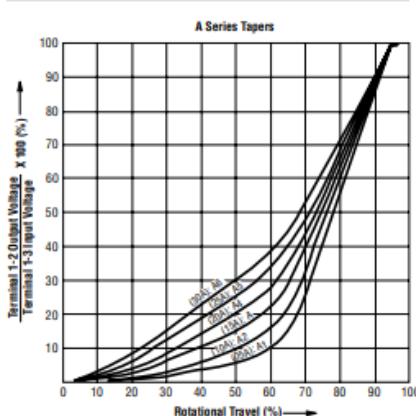
SCHEMATIC

How To Order

PDB18 1 - K 4 25 K - 103 A1

- Model _____
- Number of Sections
 - 1 = Single Section
 - 2 = Dual Section
- Terminal Configuration (Pin Layout) (see individual drawings)
 - K = PC Pins vertical/ Down Facing (12.5 mm)
 - A = PC Pins vertical/ Down Facing (18.0 mm)
 - B = PC Pins vertical Down Facing (23.0 mm)
 - E = Solder Lugs Rear Facing
 - P = PC Pins Rear Facing
 - D = PC Pins Front Facing
- Detent Option
 - 2 = Center Detent
 - 4 = No Detents
 - 5 = 10 Detent / 11 Position
 - 6 = 20 Detent / 21 Position
 - 7 = 30 Detent / 31 Position
 - 8 = 40 Detent / 41 Position
- Standard Shaft Length
 - 15 = 15 mm
 - 18 = 18 mm
 - 20 = 20 mm
 - 25 = 25 mm
 - 30 = 30 mm
- Shaft Style
 - F = Metal Flattened Shaft
 - K = Metal Knurled Type Shaft
 - 18 = 18 Toothed Serration Type
 - P = Metal Plain Shaft
- Resistance Code (See Table) _____
- Resistance Taper (See Taper Charts)
 Taper Series followed by Curve Number
- Other styles available.

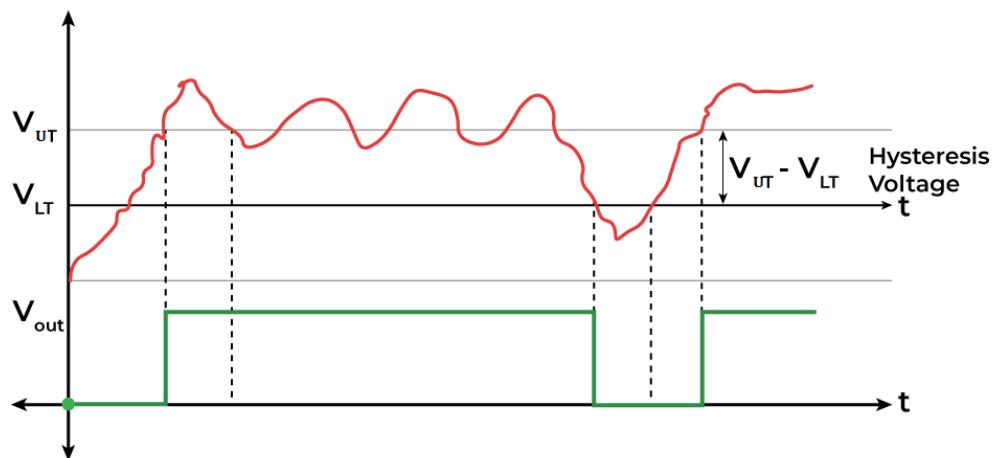
Tapers



9. วงศ์ Schmitt-Trigger คืออะไร

วงศ์ Schmitt-Trigger เป็นชนิดหนึ่งของวงศ์ Comparator ที่มีการทำงานแบบ Hysteresis ซึ่งมีหน้าที่ในการรับสัญญาณ Input เป็น Analog และแปลงเป็นสัญญาณ Output แบบ Digital ที่สมบูรณ์และเสถียร วงศ์นี้ทำงานโดยการส่ง Positive Feedback ไปยังขั้ว Input แบบ Non-Inverting หรือ Inverting ของวงศ์ Comparator จุดประสงค์หลักของ Schmitt-Trigger คือการกำจัดสัญญาณรบกวนหรือความไม่เสถียรในสัญญาณ Input และสร้างสัญญาณ Output ที่คงที่ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อทำงานกับสัญญาณที่สับเปลี่ยนรวดเร็วที่ต้องมีความคงที่และเสถียร เช่น แสงสว่าง แรงดึงดัน อุณหภูมิ ฯลฯ

10. หลักการทำงานของ Schmitt-Trigger



รูปที่ 4 การทำงานของ Schmitt-Trigger

ที่มา: <https://www.geeksforgeeks.org/schmitt-trigger/>

วงจร Comparator จะทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อสัญญาณ Input ไม่มีสัญญาณรบกวน แต่วงจร Schmitt Trigger จะยังสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้แม้จะมีสัญญาณรบกวนอยู่ก็ตาม โดยใช้แรงดันสองระดับเป็นเกณฑ์ ได้แก่ Upper Threshold Voltage และ Lower Threshold Voltage โดยจากภาพข้างต้นสัญญาณที่เป็นสีแดงคือสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เมื่อค่าสัญญาณต่ำกว่า Upper Threshold Voltage Output จะคงสถานะ Low ไว้ แต่เมื่อสัญญาณรบกวนข้าม Upper Threshold Voltage เมื่อนั้น Output จะเปลี่ยนไปเป็นสถานะ High จากนั้น Output จะเปลี่ยนกลับไปเป็นสถานะ Low อีกทีเมื่อสัญญาณลดลงต่ำกว่า Lower Threshold Voltage ซึ่งนี้เป็นหลักการทำงานของ Schmitt-Trigger รูปแบบ Non-Inverting และยังมีอีกรูปแบบคือ Inverting ซึ่งจะให้ค่ากลับกันจากรูปแบบ Non-Inverting

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	PDB181-K420K-103A2	1	อัน
2	PDB181-K420K-103B	1	อัน
3	PDB181-K420K-103C	1	อัน
4	PTA6043-2015DPA103	1	อัน
5	PTA6043-2015DPB103	1	อัน
6	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
7	บอร์ดทดลอง PotenXplorer	1	บอร์ด
8	สายอัปโหลด	1	เส้น
9	สายจมเปอร์ผู้-เมีย ความยาว 20 เซนติเมตร	3	เส้น
10	AC/DC Adapter 100-240VAC to 9VDC 2A	1	ชุด
11	เวอร์เนียร์คัลิปเปอร์ 150 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo	1	อัน

ตารางที่ 2 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Potentiometer
2. วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ผู้จัดทำจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้
 - 2.1 การทดลองเพื่อศึกษาแรงดันขาออกต่อระยะเวลาหรือองศากราฟิกของ Potentiometer และเทียบชนิดของ Potentiometer บนบอร์ดทดลอง
 - 2.2 การทดลองเพื่อดูการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt-Trigger แบบ Real-Time บน Data Inspector
3. ทำการทดลองที่ 1 เพื่อสรุปผลว่า Potentiometer บนบอร์ดทดลองมีชนิดใดบ้าง
4. ทำการทดลองที่ 2 เพื่อดูการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt-Trigger
5. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ระยะทางหรือองศาการหมุนของ Potentiometer, ชนิดของ Potentiometer

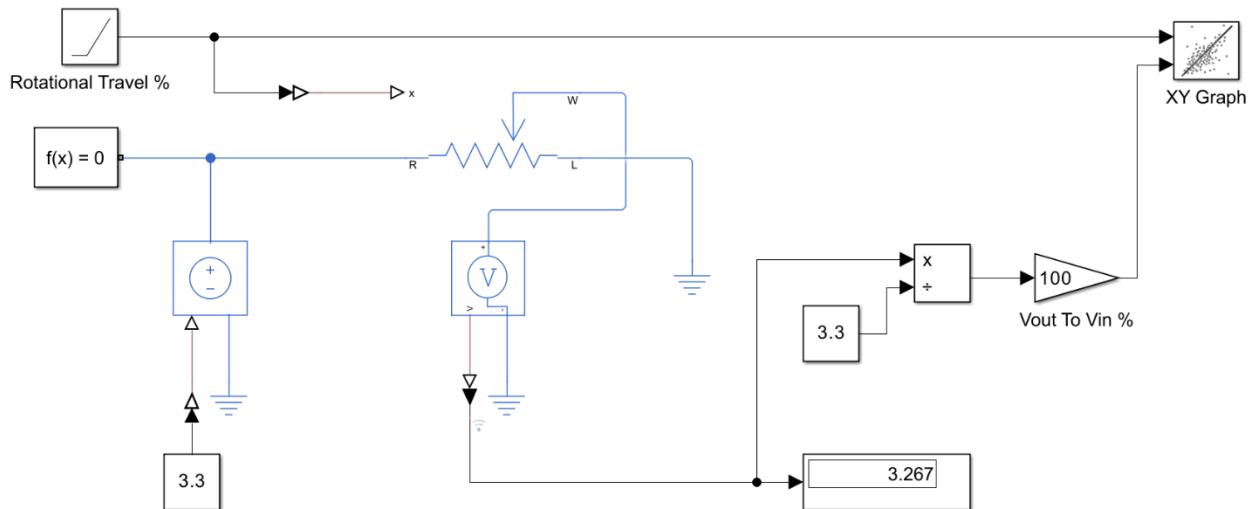
ตัวแปรตาม: แรงดันขาออก, ค่าความต้านทานระหว่างขา Wiper และ Ground

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, เวลาที่ใช้ในการจ่ายไฟเพื่อวัดค่า

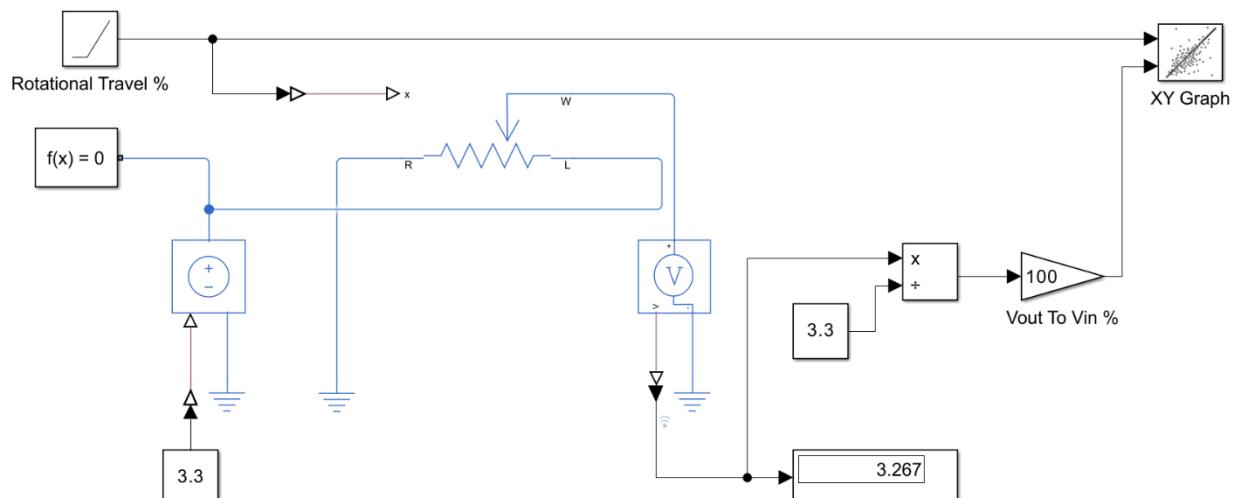
วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน PotenXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. เสียบสายจัมเปอร์จาก Ground ของ PotenXplorer เข้าขาที่ 1 ของ Potentiometer ที่จะเก็บค่า
3. เสียบสายจัมเปอร์จาก Pin A0 ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 2 ของ Potentiometer ที่จะเก็บค่า
4. เสียบสายจัมเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของ PotenXplorer เข้าขาที่ 3 ของ Potentiometer
5. หมุนหรือเลื่อนแกนของ Potentiometer เพิ่มขึ้นทีละห้าเปอร์เซ็นต์ของช่วงการทำงานทั้งหมด
6. บันทึกค่าแรงดันขาออกที่ได้ทุก ๆ ห้าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไป

การทดลองเพื่อศึกษาแรงดันขาออกต่อระยะทางหรือองศาการหมุนของ Potentiometer และเทียบชนิดของ Potentiometer บนบอร์ดทดลอง โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

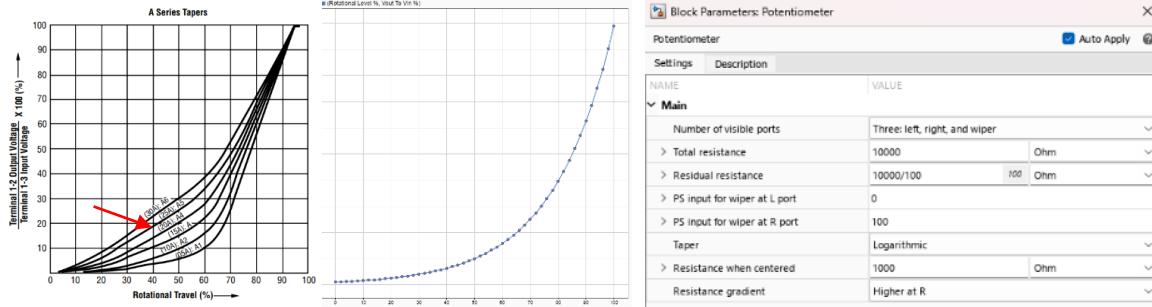


รูปที่ 5 วงจร Potentiometer ใน PotenTheory.slx

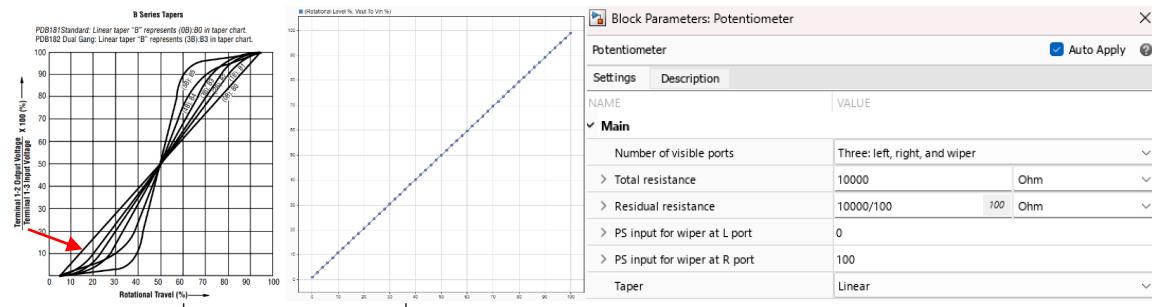


รูปที่ 6 วงจร Potentiometer แบบสลับขาใน PotenTheory.slx

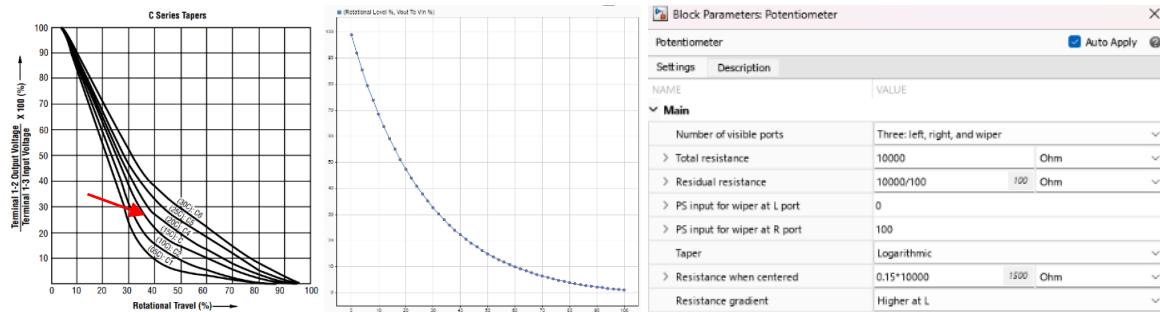
ก่อนที่จะทำการทดลองบนอุปกรณ์จริง ได้มีการสร้างโมเดล Simulink ในชื่อ PotenTheory.slx เพื่อทำการ Simulation วงจรบน PotenXplorer เพื่อศึกษาชนิดของ Potentiometer ที่จะใช้ทดลองจริง อีกทั้งยังสามารถศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของ Taper แต่ละชนิดได้ในวงจรเดียว again



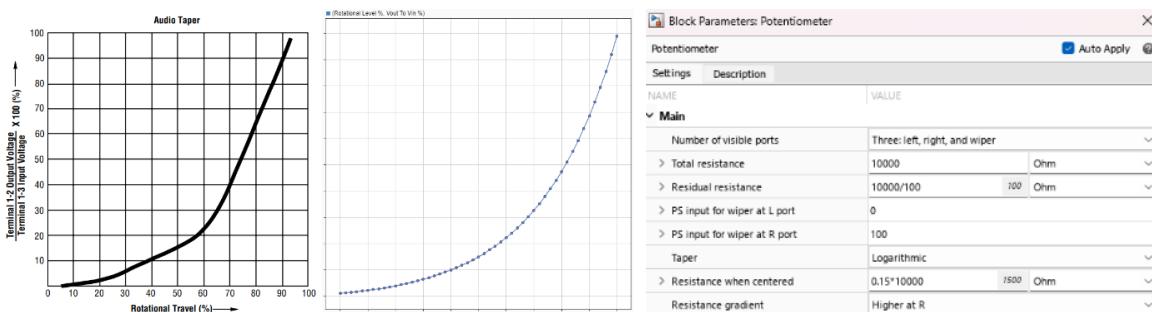
รูปที่ 7 Simulation วงจรที่ 1 และ Settings ของ Taper ชนิด A2 เทียบกับข้อมูลจาก Datasheet



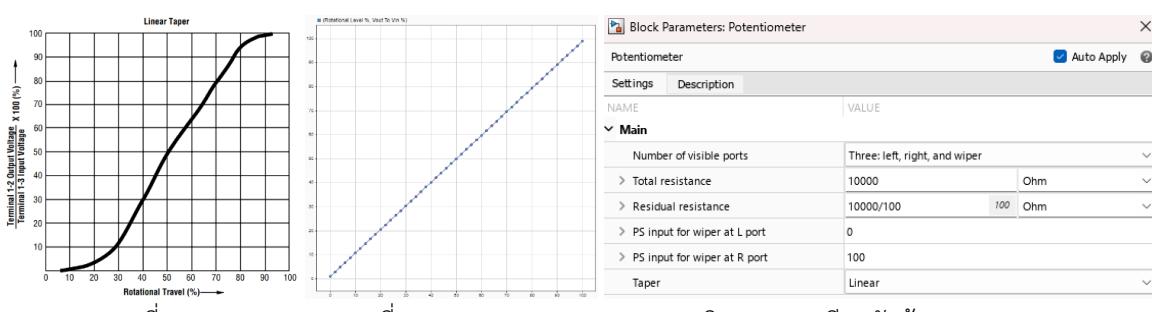
รูปที่ 8 Simulation วงจรที่ 1 และ Settings ของ Taper ชนิด B0 เทียบกับข้อมูลจาก Datasheet



รูปที่ 9 Simulation วงจรที่ 2 และ Settings ของ Taper ชนิด C เทียบกับข้อมูลจาก Datasheet



รูปที่ 10 Simulation วงจรที่ 1 และ Settings ของ Taper ชนิด Audio เทียบกับข้อมูลจาก Datasheet



รูปที่ 11 Simulation วงจรที่ 1 และ Settings ของ Taper ชนิด Linear เทียบกับข้อมูลจาก Datasheet

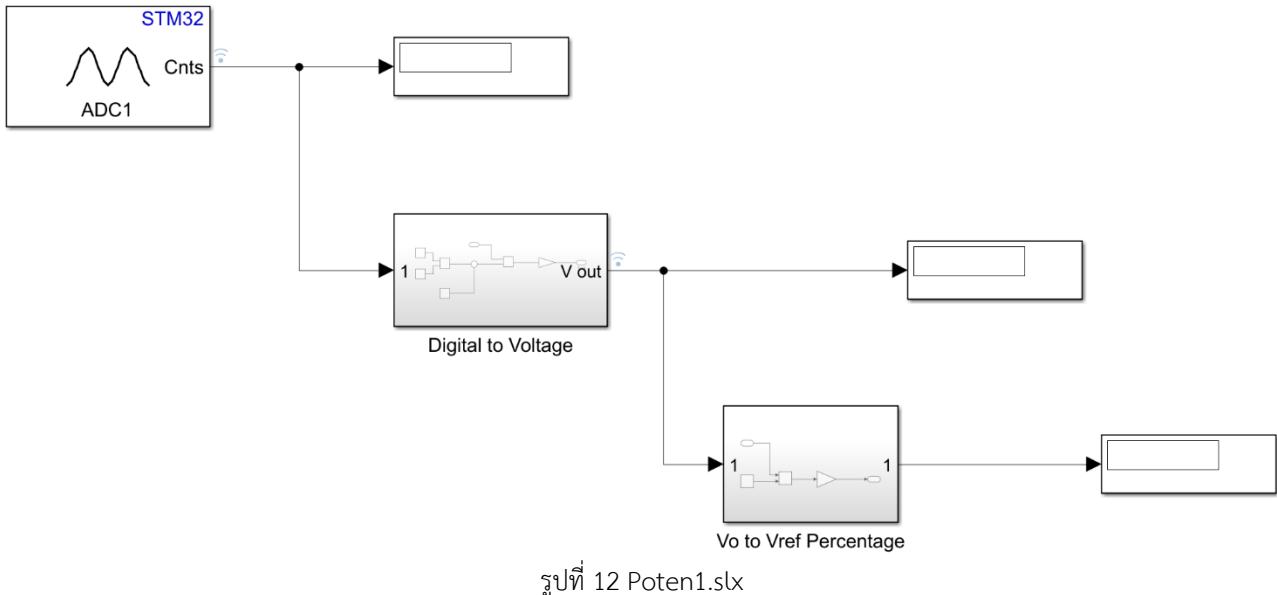
จากรูปภาพข้างต้น จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้จากการ Simulation มีความสอดคล้องกับข้อมูลจาก Datasheet และสามารถศึกษาชนิดและตัวแปรที่ส่งผลกับรูปแบบของกราฟได้ จึงทำการเก็บค่าของกราฟที่ควรจะเป็นจาก Datasheet ด้วยโปรแกรม Tracker เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ในภายหลัง โดยเก็บค่าที่ไว้ในตัวแปร XTheory และ YTheory ได้ดังนี้

1.1 XTheory

RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	0	0	0
5	4.84	3.72	5.12	5
10	9.63	9.46	9.67	9.58
14.94	14.9	15.08	15.31	14.94
19.95	19.54	19.32	20.06	19.79
24.93	24.71	23.31	25.11	24.53
29.94	29.78	29.55	29.86	29.76
34.97	34.96	34.52	35.5	35.24
40.01	39.86	39.63	39.86	39.85
44.95	44.93	44.92	45.4	44.83
49.91	49.98	50.04	49.85	49.68
54.72	55.29	54.62	54.7	54.75
60.08	59.97	59.73	60.05	60.08
65.19	65.17	65.02	65.17	65.18
70.03	69.95	69.78	70.07	69.95
75.05	75.01	74.9	74.86	74.61
80.14	80.31	80.01	80.22	80.05
85.32	85.69	84.95	85.57	85.04
90.37	90.1	89.88	90.59	90.36
95.65	94.87	95.44	95	95
99.7	100	100	100	100

1.2 YTheory

RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	100	0	0
0	0.33	99.9	0.59	0
0	5.2	86.93	0.78	1.44
0.78	11.18	74.34	1.56	2.32
1.35	16.37	63.24	2.34	3.81
2.09	21.92	53.89	3.81	7.05
3.09	27.48	38.55	5.68	12.16
4.42	33.41	28.8	7.95	21.12
5.93	38.76	22.28	10.41	30.09
7.64	44.47	17.34	12.97	40.05
9.74	49.96	14.96	14.94	49.4
12.22	55.83	12.85	17.7	56.62
16.06	61.07	10.47	22.73	63.5
21.99	66.9	8.18	29.37	70.93
32.12	72.24	6.07	39.35	78.81
46.32	77.78	4.13	50.22	85.24
59.53	83.61	2.63	63.42	93.45
72.95	89.65	1.49	76.18	96.78
86.31	94.6	0.96	88.16	98.33
98.24	99.32	0.96	90	100
98.3	100	0	90	100



รูปที่ 12 Poten1.slx

เริ่มต้นการทดลองจริง โดยสร้าง Poten1.slx เป็นโมเดล Simulink ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital บน Nucleo-STM32 โดยเมื่อสั่งเก็ตค่าที่ขึ้นใน Block Display จะพบว่าค่าที่รับเข้ามาจะยังไม่ใช่แรงดันขาออกของ Potentiometer ที่เก็บค่าโดยตรงแต่จะรับเข้ามาเป็นสัญญาณ Digital ขนาด 12-Bit เป็นตัวเลขตั้งแต่ 0-4095 จึงต้องนำไปเข้าสมการ Digital-Analog Converter เพื่อแปลงให้เป็นตัวเลขแรงดันขาออกในหน่วยโวลต์อีกครั้ง

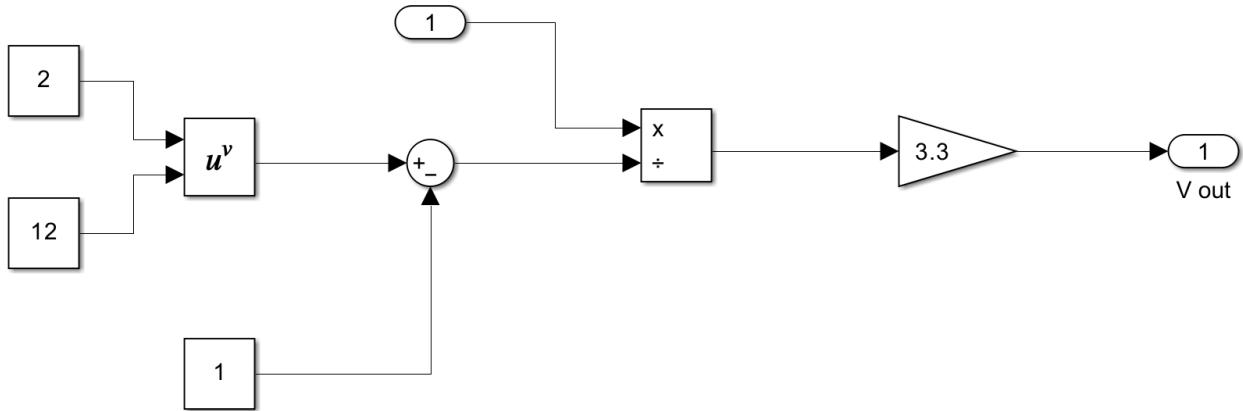
$$V_{out(analog)} = \frac{V_{out(digital)}}{2^n - 1} \times V_{in}$$

โดยที่

- $V_{out(analog)}$ คือ แรงดันขาออกที่วัดได้ในรูปแบบ Analog
- $V_{out(digital)}$ คือ แรงดันขาออกที่วัดได้ในรูปแบบ Digital
- V_{in} คือ แรงดันขาเข้า
- n คือ ขนาด Bit ของข้อมูลที่รับเข้ามา

ซึ่งเมื่อแทนค่าของข้อมูลที่มี จะได้ว่า

$$V_{out(analog)} = \frac{V_{out(digital)}}{4095} \times 3.3$$



รูปที่ 13 Subsystem Digital to Voltage

แล้วจึงนำสมการที่ได้ไปทำเป็นโมเดล Simulink ซึ่งอยู่ภายใน Subsystem Digital to Voltage และต่อ Block Display เพื่อการดูค่าของข้อมูล จากนั้นจึง Log สัญญาณแรงดันขาออกแบบ Analog ที่ได้ เพื่อดูรูปแบบสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงแบบ Real-Time และเก็บค่าภายใน Data Inspector ซึ่งหลังจากที่ได้ข้อมูลครบทั้ง 10001 ค่า จึงทำการหาค่า V_{RMS} เพื่อให้มีความถูกต้องก่อนที่จะนำมาสร้างกราฟ โดยใช้ Function ดัง Code

```
V_out = rms(RAW_DATA.Data); % แปลงค่า Vrms (RAW_DATA คือตำแหน่งสำหรับใส่ข้อมูล .mat ที่เก็บมา)
```

Code ที่ 1 collect_data.m

แล้วจึงนำค่าแรงดันขาออกแบบ Analog ที่ผ่านการ Root Mean Square ที่ได้จัดเก็บภายใน FirstTable ได้ถัดไปจึงนำไปแปลงเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยเทียบกับแรงดันขาเข้าและจัดเก็บไว้ใน FirstPercentTable เพื่อนำไปวิเคราะห์และสร้างกราฟตามตัวแปรรายใน Datasheet

$$\frac{V_{out(analog)}}{V_{in}} \% = \frac{V_{out(analog)}}{V_{in}} \times 100$$

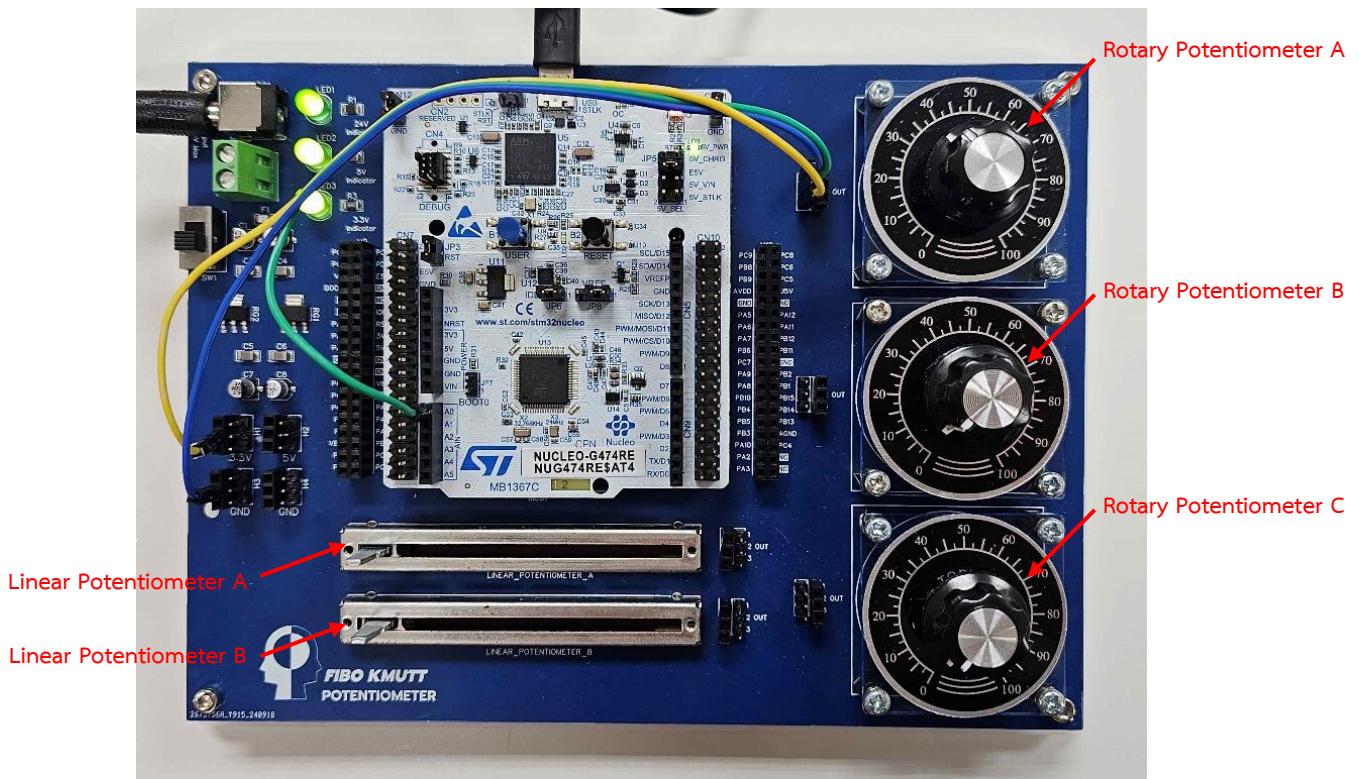
โดยที่

$V_{out(analog)}$ คือ แรงดันขาออกที่วัดได้ในรูปแบบ Analog

V_{in} คือ แรงดันขาเข้า

ซึ่งเมื่อแทนค่าของข้อมูลที่มี จะได้ว่า

$$\frac{V_{out(analog)}}{3.3} \% = \frac{V_{out(analog)}}{3.3} \times 100$$



รูปที่ 14 PotenXplorer

ในการวัดค่าและเก็บค่าแรงดันข้าออกจะใช้ Poten1.slx ควบคู่กับ Data Inspector โดยเริ่มจาก Rotary Potentiometer ก่อน โดยการวัดจะอ้างอิงจากแผ่นเหล็กที่มีตัวเลขบอก Rotational Travel ตั้งแต่ 0-100 กำกับไว้ และเก็บค่าทุก ๆ 5% ตามตัวเลขบนแผ่นเหล็ก เมื่อเก็บครบทั้งสามตัวแล้วจึงเริ่มการวัดค่าและเก็บค่าของ Linear Potentiometer ทั้งสองตัวต่อ โดยอ้างอิงระยะทางการเคลื่อนที่จากเวอร์เนียร์คัลิปเปอร์ 150 มิลลิเมตร ยึดหัว Mitutoyo และเก็บค่าทุก ๆ 5% ซึ่งคือ 3 มิลลิเมตรเนื่องจากระยะการเคลื่อนที่ของแกนเลื่อนทั้งหมดคือ 60 มิลลิเมตร อ้างอิงจาก Datasheet

หลังจากดำเนินการทดลองแล้วจึงนำข้อมูลค่าแรงดันข้าออกที่ได้ทุก ๆ ห้าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไปของ Potentiometer ทุกอัน ไปพล็อตกราฟ โดยให้เปอร์เซ็นต์ของช่วงการทำงานทั้งหมดอยู่ในแกน X และเปอร์เซ็นต์ของแรงดันข้าออกเมื่อเทียบกับแรงดันข้าเข้าอยู่ในแกน Y

```

figure;
clf('reset');

linetype1 = '-* ';
linetype2 = '-';

shtitle('1st Iteration Potentiometer Characteristics Graph', 'Interpreter','latex');

Xaxes = FirstPercentTable.Travel;
Yaxes = [FirstPercentTable.RoA, FirstPercentTable.RoB, FirstPercentTable.RoC,
FirstPercentTable.LiA, FirstPercentTable.LiB];
XError = (0:5:100);
for i = 1:21
    m = mod(i, 2);
    if m == 0
        XError(1,i) = nan;
    end
end

titles = ["Rotary Potentiometer A", "Rotary Potentiometer B", ...
          "Rotary Potentiometer C", "Slide Potentiometer A", ...
          "Slide Potentiometer B"];

ax_1 = subplot(2,3,1);
ax_2 = subplot(2,3,2);
ax_3 = subplot(2,3,3);
ax_4 = subplot(2,3,4);
ax_5 = subplot(2,3,5);
ax_6 = subplot(2,3,6);

ax = [ax_1, ax_2, ax_3, ax_4, ax_5, ax_6];
c = 'rgbmc';

for i = 1:5
    plot(ax(i), Xaxes, Yaxes(:,i), [c(i) linetype1], 'LineWidth', 1.5);
    hold(ax(i), "on");
    plot(ax(i), XTheory(:,i), YTheory(:,i), ['k' linetype2], 'LineWidth', 0.5);
    errorbar(ax(i), XError, YTheory(:,i), YTheory(:,i)*0.2,"vertical","Color",'k');
    hold(ax(i), "off");

    title(ax(i), titles(i));
    axis(ax(i), "padded");
    grid(ax(i), 'on');
    xlabel(ax(i), 'Rotational Travel (%)');
    ylabel(ax(i), 'VOut to VRef (%)');
    xticks(ax(i), 0:10:100);
    yticks(ax(i), 0:10:100);

    if i == 3
        legend(ax(i), "Measured", "Theory", Location="northeast");
    else
        legend(ax(i), "Measured", "Theory", Location="southeast");
    end
end

for i = 1:5
    plot(ax_6, Xaxes, Yaxes(:,i), [c(i) '-'], 'LineWidth', 1.5);
    hold(ax_6, "on")

```

```

end
hold(ax_6, "off")
axis(ax_6, "square");
grid(ax_6, 'on');
xlabel(ax_6, 'Rotational Travel (%)');
ylabel(ax_6, 'VOut to VRef (%)');
xticks(ax_6, 0:10:100);
yticks(ax_6, 0:10:100);
title(ax_6, 'All');

set(gcf, "Color", 'w')

```

Code ที่ 2 first_plotter.m

Code สำหรับการสร้างกราฟของการเก็บค่าครั้งที่ 1 เพื่อดูแนวโน้มความสอดคล้องระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ควรจะเป็นตาม Datasheet

```

figure;
clf('reset');

linetype1 = '-* ';
linetype2 = '-';

shtitle('2nd Iteration Potentiometer Characteristics Graph', 'Interpreter','latex');

Xaxes = FinalPercentTable.Travel;
Yaxes = [FinalPercentTable.RoA, FinalPercentTable.RoB, FinalPercentTable.RoC,
FinalPercentTable.LiA, FinalPercentTable.LiB];
XError = (0:5:100);
for i = 1:21
    m = mod(i, 2);
    if m == 0
        XError(1,i) = nan;
    end
end

titles = ["Rotary Potentiometer A", "Rotary Potentiometer B", ...
          "Rotary Potentiometer C", "Slide Potentiometer A", ...
          "Slide Potentiometer B"];

ax_1 = subplot(2,3,1);
ax_2 = subplot(2,3,2);
ax_3 = subplot(2,3,3);
ax_4 = subplot(2,3,4);
ax_5 = subplot(2,3,5);
ax_6 = subplot(2,3,6);

ax = [ax_1, ax_2, ax_3, ax_4, ax_5, ax_6];
c = 'rgbmc';

for i = 1:5
    plot(ax(i), Xaxes, Yaxes(:,i), [c(i) linetype1], 'LineWidth', 1.5);
    hold(ax(i), "on");
    plot(ax(i), XTheory(:,i), YTheory(:,i), ['k' linetype2], 'LineWidth', 0.5);
    errorbar(ax(i), XError, YTheory(:,i), YTheory(:,i)*0.2,"vertical","Color",'k');

```

```

hold(ax(i), "off");

title(ax(i), titles(i));
axis(ax(i), "padded");
grid(ax(i), 'on');
xlabel(ax(i), 'Rotational Travel (%)');
ylabel(ax(i), 'VOut to VRef (%)');
xticks(ax(i), 0:10:100);
yticks(ax(i), 0:10:100);

if i == 3
    legend(ax(i), "Measured", "Theory", Location="northeast");
else
    legend(ax(i), "Measured", "Theory", Location="southeast");
end
end

for i = 1:5
    plot(ax_6, Xaxes, Yaxes(:,i), [c(i) '-'], 'LineWidth', 1.5);
    hold(ax_6, "on")
end
hold(ax_6, "off")
axis(ax_6, "square");
grid(ax_6, 'on');
xlabel(ax_6, 'Rotational Travel (%)');
ylabel(ax_6, 'VOut to VRef (%)');
xticks(ax_6, 0:10:100);
yticks(ax_6, 0:10:100);
title(ax_6, 'All');

set(gcf, "Color", 'w')

```

Code ที่ 3 final_plotter.m

Code สำหรับการสร้างกราฟของการเก็บค่าครั้งที่ 2 เพื่อดูแนวโน้มความสอดคล้องระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ควรจะเป็นตาม Datasheet

ผลการทดลองที่ 1

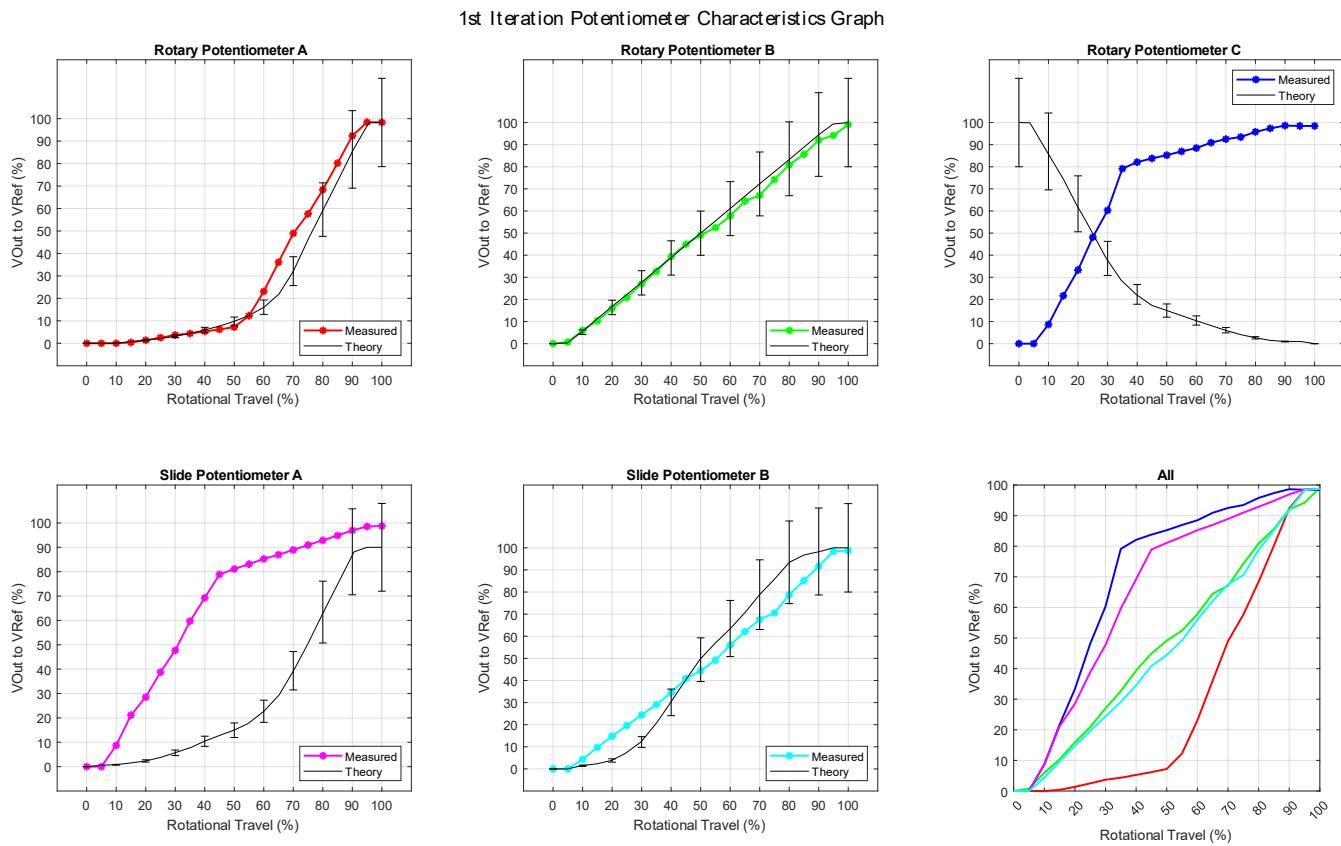
1.1 FirstTable: ค่าแรงดันขาออกแบบ Analog ที่ผ่านการ Root Mean Square รอบที่ 1

Travel	RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	0	0	0	0
5	0	0.02353	0	0	0
10	0	0.19774	0.28644	0.2877	0.14244
15	0.012574	0.34024	0.71448	0.69708	0.31994
20	0.045288	0.52542	1.0994	0.94096	0.48754
25	0.082036	0.68884	1.588	1.28	0.64694
30	0.1217	0.89192	1.99	1.575	0.8044
35	0.14312	1.0768	2.6114	1.969	0.9598
40	0.1736	1.2994	2.7092	2.2856	1.1396
45	0.20342	1.4834	2.7652	2.6042	1.3484
50	0.23806	1.621	2.813	2.676	1.4666
55	0.40468	1.7306	2.8692	2.7424	1.6242
60	0.76154	1.9066	2.9194	2.813	1.8478
65	1.1908	2.1274	3.0002	2.8694	2.0484
70	1.6156	2.2138	3.0528	2.9346	2.2296
75	1.9014	2.4492	3.0838	3.0016	2.3282
80	2.2558	2.6688	3.161	3.0646	2.5994
85	2.6464	2.8256	3.213	3.13	2.811
90	3.047	3.0374	3.255	3.1994	3.0258
95	3.2476	3.1088	3.249	3.252	3.2454
100	3.245	3.2692	3.249	3.2584	3.2602

1.2 FirstPercentTable: สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยนำ FirstTable เทียบกับแรงดันขาเข้า รอบที่ 1

Travel	RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	0	0	0	0
5	0	0.71303	0	0	0
10	0	5.992121	8.68	8.718182	4.316364
15	0.381024	10.3103	21.65091	21.12364	9.695152
20	1.372364	15.92182	33.31515	28.51394	14.77394
25	2.485939	20.87394	48.12121	38.78788	19.60424
30	3.687879	27.02788	60.30303	47.72727	24.37576
35	4.33697	32.6303	79.13333	59.66667	29.08485
40	5.260606	39.37576	82.09697	69.26061	34.53333
45	6.164242	44.95152	83.79394	78.91515	40.86061
50	7.213939	49.12121	85.24242	81.09091	44.44242
55	12.26303	52.44242	86.94545	83.10303	49.21818
60	23.07697	57.77576	88.46667	85.24242	55.99394
65	36.08485	64.46667	90.91515	86.95152	62.07273
70	48.95758	67.08485	92.50909	88.92727	67.56364
75	57.61818	74.21818	93.44848	90.95758	70.55152
80	68.35758	80.87273	95.78788	92.86667	78.7697
85	80.19394	85.62424	97.36364	94.84848	85.18182
90	92.33333	92.04242	98.63636	96.95152	91.69091
95	98.41212	94.20606	98.45455	98.54545	98.34545
100	98.33333	99.06667	98.45455	98.73939	98.79394

1.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางหรือองศาเทียบกับสัดส่วนเบอร์เซ็นต์แรงดันขาออก รอบที่ 1



จากการภาพทั้ง 5 กราฟ จะสังเกตได้ว่า Rotary Potentiometer A, Rotary Potentiometer B และ Slide Potentiometer B มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางหรือองศาเทียบกับสัดส่วนเบอร์เซ็นต์แรงดันขาออกที่วัดได้ที่ สอดคล้องและคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากจำนวนจุดของข้อมูลที่อยู่ภายใน Tolerance ที่กำหนดมากกว่าหรือเท่ากับ 50% ของจุดข้อมูลที่เปรียบเทียบทั้งหมด

แต่ Rotary Potentiometer C และ Slide Potentiometer A มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางหรือองศาเทียบ กับสัดส่วนเบอร์เซ็นต์แรงดันขาออกที่วัดได้ที่ไม่มีความสอดคล้องและคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์จาก Datasheet โดย อ้างอิงจากจำนวนจุดของข้อมูลที่อยู่ภายใน Tolerance ที่กำหนดน้อยกว่า 50% ของ จุดข้อมูลที่เปรียบเทียบทั้งหมด

จึงต้องสมมติฐานย่อยโดยคร่าวๆจากการแสดงผลของกราฟว่าการกลับขั้วระหว่างแรงดันขาเข้าและ Ground จะ สามารถทำให้ข้อมูลจากการวัดเกิดความสอดคล้องและคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์จาก Datasheet มากรยิ่งขึ้น

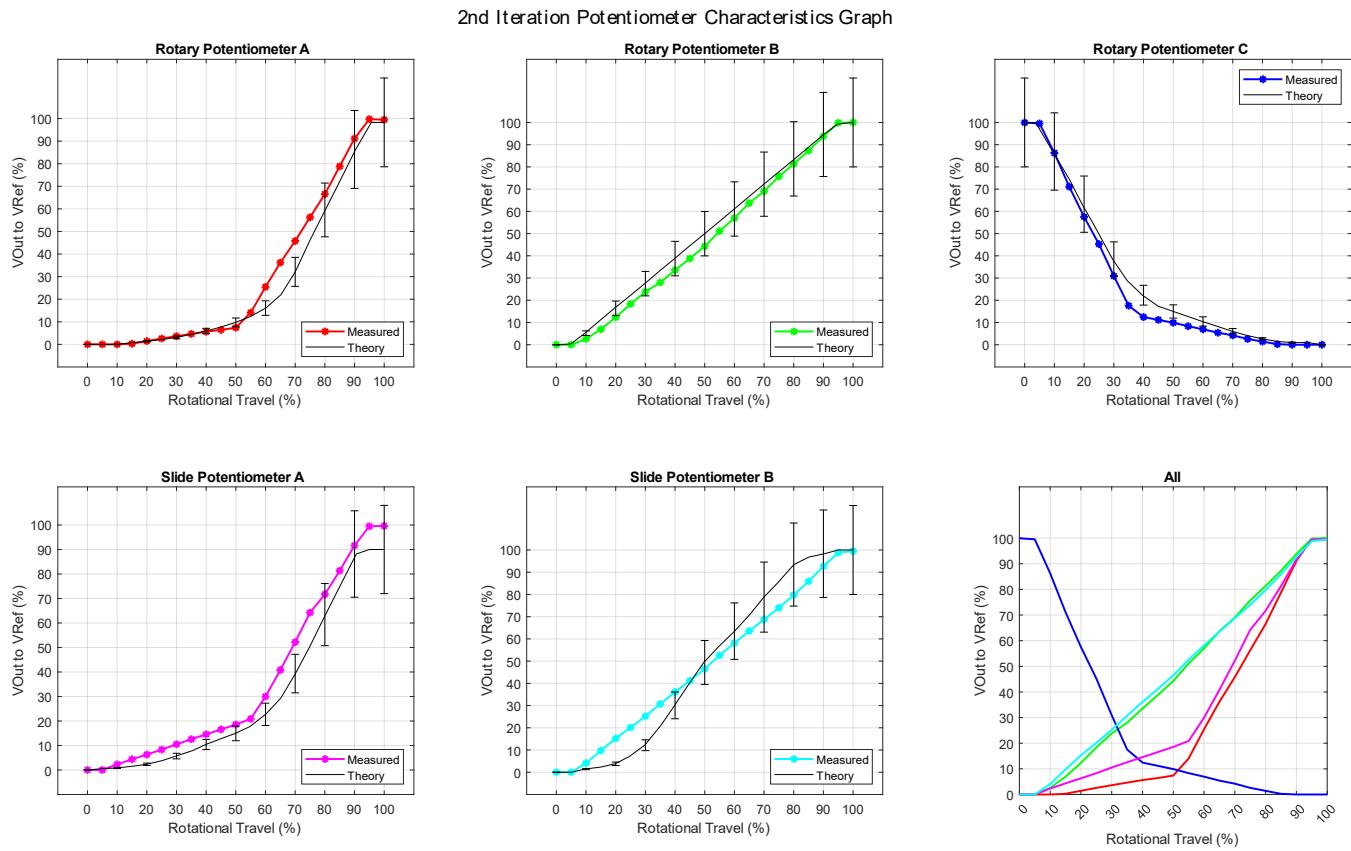
2.1 FinalTable: ค่าแรงดันขาออกแบบ Analog ที่ฝ่านการ Root Mean Square รอบที่ 2

Travel	RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	0	3.297952	0	0
5	0	0	3.28543	0	0
10	0	0.085344	2.847484	0.076367	0.135215
15	0.009268	0.228746	2.346999	0.143866	0.322641
20	0.047685	0.407442	1.898022	0.208127	0.502937
25	0.085499	0.604633	1.493183	0.274085	0.664376
30	0.119378	0.785619	1.019981	0.346867	0.83259
35	0.152825	0.923485	0.579128	0.414947	1.013994
40	0.185717	1.106634	0.41033	0.480578	1.192316
45	0.211583	1.280856	0.368836	0.5463	1.35881
50	0.243867	1.461514	0.326891	0.612476	1.53447
55	0.463501	1.686983	0.274584	0.688709	1.73559
60	0.839942	1.879842	0.22933	0.989499	1.918597
65	1.194899	2.102357	0.178514	1.347375	2.097146
70	1.510605	2.278343	0.13929	1.72258	2.269237
75	1.857351	2.497893	0.085401	2.120032	2.442414
80	2.195404	2.684936	0.046701	2.365958	2.631895
85	2.600584	2.880396	0.008622	2.684017	2.835193
90	3.007833	3.09488	0	3.024243	3.05796
95	3.291055	3.29481	0	3.2829	3.260981
100	3.282203	3.3	0	3.287558	3.283543

2.2 FinalPercentTable: สัดส่วนเบอร์เซ็นต์โดยนำ FinalTable เทียบกับแรงดันขาเข้า รอบที่ 2

Travel	RoA	RoB	RoC	LiA	LiB
0	0	0	99.93794	0	0
5	0	0	99.55849	0	0
10	0	2.586194	86.2874	2.314157	4.097423
15	0.280849	6.931683	71.12117	4.359575	9.776996
20	1.444995	12.34672	57.51581	6.306866	15.24052
25	2.590884	18.32222	45.24798	8.305592	20.13261
30	3.617504	23.80664	30.90853	10.51111	25.23
35	4.631073	27.98439	17.54933	12.57416	30.72709
40	5.627795	33.53437	12.43425	14.56297	36.13078
45	6.411616	38.81382	11.17686	16.55455	41.17608
50	7.38991	44.28831	9.905789	18.55989	46.4991
55	14.04549	51.1207	8.320734	20.86998	52.59364
60	25.45279	56.9649	6.949382	29.98481	58.13931
65	36.20906	63.70779	5.4095	40.82955	63.54987
70	45.77591	69.0407	4.220895	52.1994	68.76475
75	56.28336	75.69373	2.587907	64.24338	74.01255
80	66.52739	81.36171	1.415188	71.6957	79.75439
85	78.80557	87.28472	0.261283	81.33386	85.91495
90	91.14645	93.78426	0	91.64374	92.66545
95	99.72895	99.84273	0	99.48182	98.81762
100	99.46071	100	0	99.62298	99.50131

2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางหรือองศาเทียบกับสัดส่วนเบอร์เช็นต์แรงดันข้าออก รอบที่ 2



จากการที่ 5 กราฟ จะสังเกตได้ว่า Potentiometer ทุกตัวมีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางหรือองศาเทียบกับสัดส่วนเบอร์เช็นต์แรงดันข้าออกที่วัดได้ที่สอดคล้องและคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากจำนวนจุดของข้อมูลที่อยู่ภายใต้ Tolerance ที่กำหนดมากกว่าหรือเท่ากับ 50% ของจุดข้อมูลที่เปรียบเทียบทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าการสรุปผลและอภิปราย

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาหรือองค่าเทียบกับสัดส่วนเปอร์เซ็นต์แรงดันขาออก รอบที่ 2 ของ Potentiometer ทั้ง 5 ตัวบนบอร์ดทั้งหมด มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์จาก Datasheet โดยตรง จึงสามารถสรุปได้ว่า

- Rotary Potentiometer A มีชนิด Taper ชนิด A2 จริง
- Rotary Potentiometer B มีชนิด Taper ชนิด B0 จริง
- Rotary Potentiometer C มีชนิด Taper ชนิด C จริง
- Linear Potentiometer A มีชนิด Taper ชนิด Audio จริง
- Linear Potentiometer C มีชนิด Taper ชนิด Linear จริง

การทดลองที่ 2

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ค่าความต้านทานในวงจร Schmitt-Trigger, ระยะเวลาหรือองค่าการหมุนของ Potentiometer

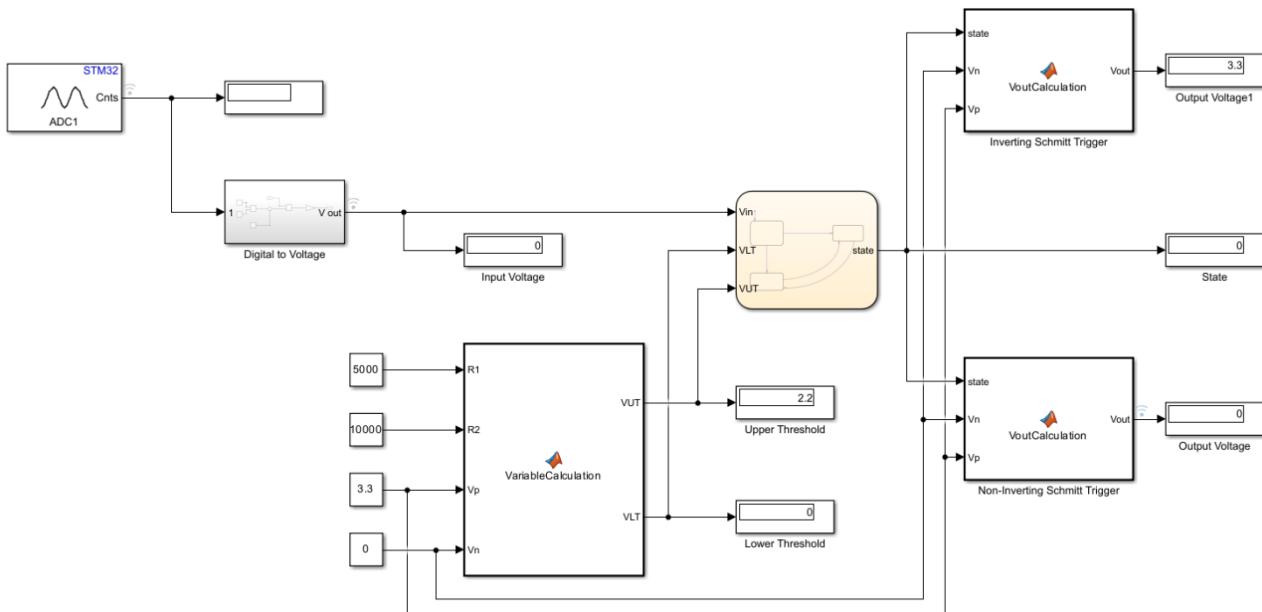
ตัวแปรตาม: สัญญาณ Digital Output

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, และชนิดของ Potentiometer

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน PotenXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Ground ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 1 ของ Potentiometer
3. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin A0 ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 2 ของ Potentiometer
4. เสียบสายจ้มเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 3 ของ Potentiometer
5. เลื่อนแกนของ Potentiometer เพิ่มขึ้นและลดลงไปเรื่อย ๆ
6. สังเกตแรงดันขาออกที่เปลี่ยนแปลงไปแบบ Real-Time บน Data Inspector

การทดลองเพื่อดูการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt-Trigger แบบ Real-Time บน Data Inspector ซึ่งจากการทดลองที่ 1 พบร่วมกับ Linear Potentiometer B บนบอร์ดทดลอง เป็น Linear Potentiometer ที่มีชนิด Taper เป็นชนิด B จึงเลือกที่จะนำ Potentiometer ตัวนี้มาใช้ในการทดลองที่ 2 เนื่องจากสามารถวัดผลและช่วงการทำงานได้อย่างสะดวกและแม่นยำ โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 15 PotenSchmittwSTM.slx

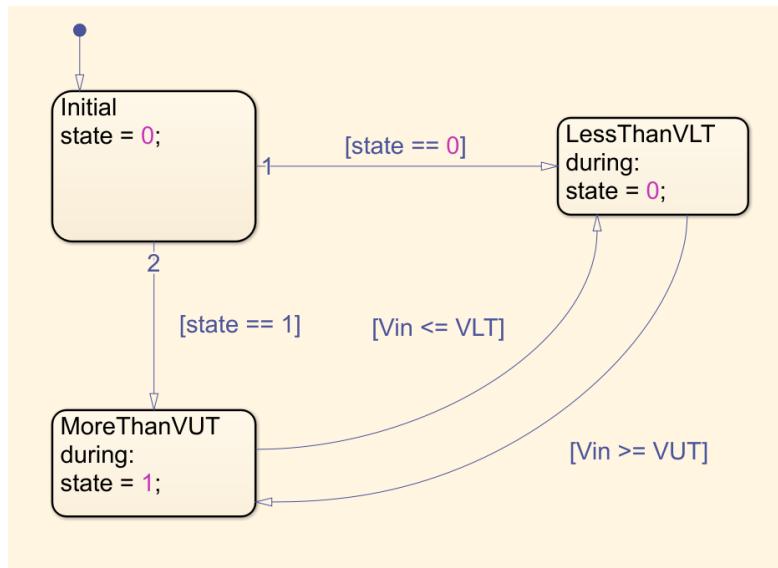
PotenSchmittwSTM เป็นโมเดล Simulink ที่นำส่วนการรับค่าและ Digital-Analog Converter จาก Poten1.slx มาเพิ่ม Function ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวงจร Schmitt-Trigger ซึ่งประกอบด้วย

```
% VUT : Upper Threshold Voltage
% VLT : Lower Threshold Voltage
% Vout : Output Voltage
% Vin : Input Voltage
% R1 : 1st Resistor
% R2 : 2nd Resistor
% Vp : Op-Amp V+
% Vn : Op-Amp V-
function [VUT, VLT] = VariableCalculation(R1,R2,Vp, Vn)

VUT = Vp * (R2 / (R1 + R2));
VLT = Vn * (R2 / (R1 + R2));
```

Code ที่ 4 VariableCalculation Function

Code สำหรับคำนวณแรงดัน Upper Threshold และ Lower Threshold ที่จะนำไปใช้ในวงจร



Schmitt-Trigger Stateflow

Stateflow สำหรับจำลองการทำงานของวงจร Schmitt-Trigger ตามรูปแบบ Hysteresis

```

% Vout : Output Voltage
% Vp : Op-Amp V+
% Vn : Op-Amp V-

function Vout = VoutCalculation(state, Vn, Vp)
Vout = 0;

if state == 1
    Vout = Vn;
elseif state == 0
    Vout = Vp;
end

```

Code ที่ 5 Inverting Vout Calculation

```

% Vout : Output Voltage
% Vp : Op-Amp V+
% Vn : Op-Amp V-

function Vout = VoutCalculation(state, Vn, Vp)
Vout = 0;

if state == 1
    Vout = Vp;
elseif state == 0
    Vout = Vn;
end

```

Code ที่ 6 Non-Inverting Vout Calculation

Code สำหรับการนำ State ที่ได้จาก Stateflow ข้างต้นมาแปลงกลับเป็นแรงดันขาออกใน 2 รูปแบบของวงจร Schmitt-Trigger ซึ่งคือ Non-Inverting และ Inverting

ผลการทดลองที่ 2

จากการจำลองวงจร Schmitt-Trigger โดยกำหนดตัวแปร ดังนี้

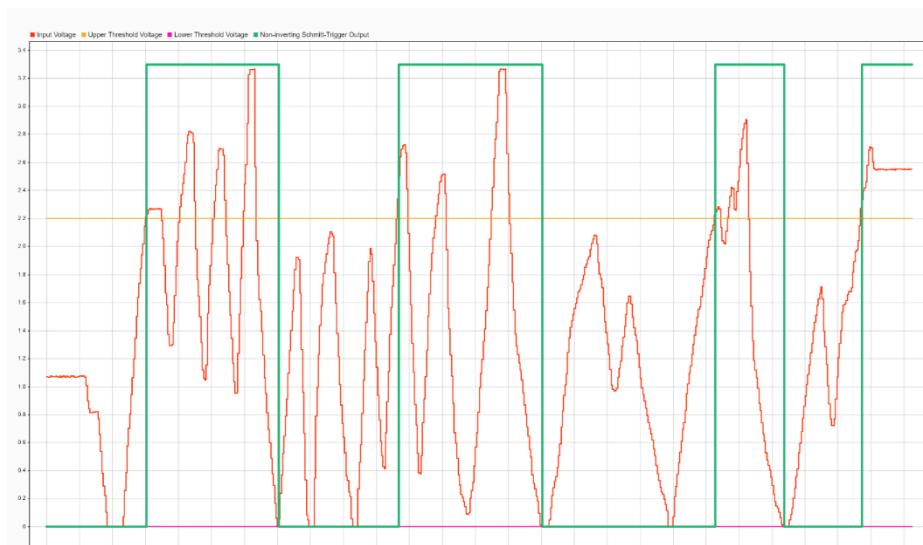
ความต้านทานตัวที่ 1: 5000Ω

ความต้านทานตัวที่ 2: 10000Ω

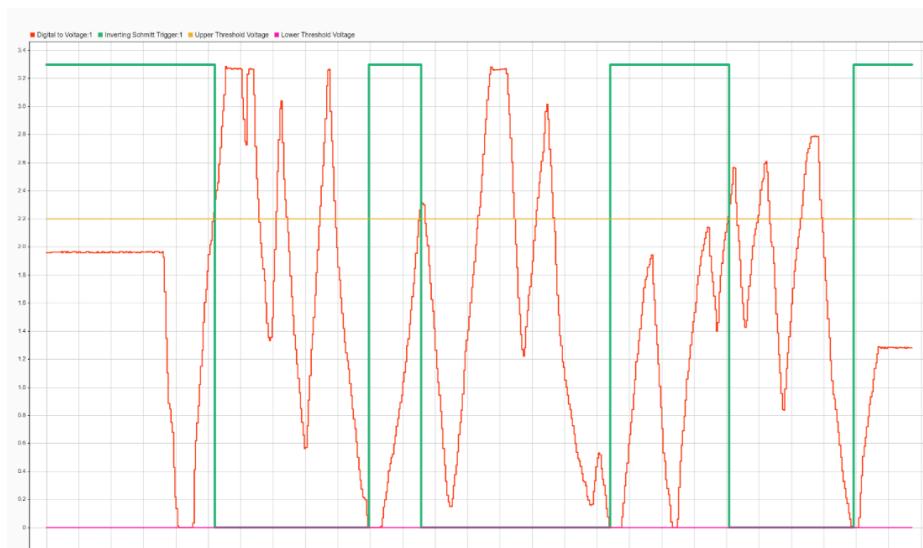
แรงดันเลี้ยง Op-Amp+: $3.3V$

แรงดันเลี้ยง Op-Amp-: $0V$

จะได้ว่า Upper Threshold Voltage มีค่า $2.2V$ และ Lower Threshold Voltage มีค่า $0V$



รูปที่ 16 สัญญาณจากการ Schmitt-Trigger แบบ Non-Inverting



รูปที่ 17 สัญญาณจากการ Schmitt-Trigger แบบ Inverting

สัญญาณไฟฟ้าในรูปภาพแสดงถึงการทำงานของวงจร Schmitt-Trigger ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำทั้งแบบ Inverting และ Non-Inverting

สรุปผลการทดลองที่ 2

วงจร Schmitt Trigger มีการทำงานสองรูปแบบหลัก คือแบบ Inverting และแบบ Non-Inverting ซึ่งทั้งสองรูปแบบนี้มีหลักการทำงานที่คล้ายกันในการกรองสัญญาณรบกวนและแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็น Digital ที่ชัดเจน โดยใช้การควบคุมแรงดันผ่านหลักการของ Hysteresis ที่มีการกำหนดจุดแรงดันสองจุดที่เรียกว่า Upper Threshold และ Lower Threshold ทำให้สัญญาณ Output มีการเปลี่ยนแปลงสถานะได้อย่างเสถียรแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเล็กน้อยหรือสัญญาณรบกวนก็ตาม

จากราฟของสัญญาณที่ได้จากการทดลอง Schmitt Trigger แบบ Inverting สัญญาณ Input จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบ Digital โดยมีการสลับเฟสกับสัญญาณ Output ซึ่งหมายความว่าเมื่อแรงดัน Input สูงเกิน Upper Threshold Output จะสลับเป็น Low แต่เมื่อแรงดัน Input ลดลงมาต่ำกว่า Lower Threshold Output จะกลับมาเป็นค่า High ซึ่งการสลับเฟสนี้หมายความว่าการใช้งานในวงจรที่ต้องการแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นดิจิตอลที่ชัดเจน และต้องการให้ Output เป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับ Input

ในทางกลับกัน วงจร Schmitt Trigger แบบ Non-Inverting ไม่มีการกลับเฟสระหว่าง Input กับ Output ดังนั้น เมื่อแรงดัน Input สูงเกินกว่า Upper Threshold สัญญาณ Output จะสลับเป็นค่า High ตาม และเมื่อแรงดัน Input ต่ำกว่า Lower Threshold Output ก็จะกลับมาเป็นค่า Low เช่นกัน วงจร Schmitt Trigger แบบ Non-Inverting จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการการกลับเฟส เช่นการ Signal Conditioning ที่ต้องการเสถียรภาพหรือการใช้งานที่ต้องการแปลงสัญญาณ Analog ที่มี Noise เป็นสัญญาณ Digital ที่ชัดเจน

อภิรายผลการทดลอง

ชนิดของ Potentiometer ที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการใช้งานที่แตกต่างกันตามโครงสร้างทางกายภาพและวัสดุที่ใช้ในการผลิต

จากการบันทึกค่าที่วัดได้และกราฟที่สร้างขึ้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าชนิดของ Potentiometer ที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างทางกายภาพและวัสดุที่ใช้ในการผลิตภายในของ Potentiometer แต่ละชนิด ส่งผลให้การเลือกใช้งาน Potentiometer แต่ละชนิดมีการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันไป

แรงดันไฟฟ้าข้าอกของ Potentiometer จะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงตามระยะทางหรือองศาการหมุนของแกนหมุน

จากการบันทึกค่าที่วัดได้และกราฟที่สร้างขึ้นทั้งหมด บ่งบอกได้ว่า Potentiometer ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันข้าอกเป็นเส้นตรงตามระยะทางหรือองศาการหมุนของแกนหมุน มี 2 วันในการทดลองคือ Rotary Potentiometer B และ Slide Potentiometer B ซึ่งมีชนิด Taper เป็นชนิด B ส่วนอันอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของ Taper รายอัน

การใช้งาน Schmitt-Trigger จะช่วยปรับปรุงการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ให้มีความเสถียรขึ้น โดยการลดสัญญาณรบกวนที่อยู่ข้างเดียงค่า Threshold ซึ่งจะส่งผลต่อการตอบสนองของการแปลงสัญญาณ

จากการทดลองเปลี่ยนค่ากลับไปกลับมาเพื่อดูการทำงานของวงจร Schmitt Trigger วงจร Schmitt Trigger มีการกำหนดค่าแรงดันจุดเปลี่ยนสองจุดที่เรียกว่า Upper Threshold และ Lower Threshold ซึ่งใช้หลักการ Hysteresis เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกลับ ๆ จุดเปลี่ยนสถานะของแรงดัน วงจร Schmitt Trigger จึงช่วยทำให้การแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital มีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจาก Output จะไม่แกว่งกลับไปกลับมาเมื่อสัญญาณ Input มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือมี Noise จากภายนอก โดยจะตอบสนองเฉพาะเมื่อแรงดันเกินหรือต่ำกว่าช่วงของ Threshold เท่านั้น

ข้อเสนอแนะ

- แผ่นเหล็กที่ใช้เป็นมาตรฐานวัดเบอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของ Rotary Potentiometer สามารถยับได้ง่าย ทำให้การเก็บค่าบกพร่องในบางจุดของข้อมูลได้
- การระบุทิศทางที่แน่ชัดของ Potentiometer ทุกตัว จากการทดลองในรอบแรกพบว่าเมื่อ Setup ทุกอย่างเหมือนกันหมดในการทดสอบทุกตัว กราฟความสัมพันธ์ที่ออกมากลับด้านกับภายใน Datasheet ทั้งในแกน X และแกน Y

Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาและอธิบายหลักการทำงานและลักษณะสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ได้เมื่อ Magnetic Flux Density เปลี่ยนแปลงไป
- เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Field Shielding และ Magnetic Flux Density
- เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมและใช้ MATLAB และ Simulink เพื่อรับและแสดงผลสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor โดยใช้งานร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE แบบ Real-Time และแสดงผลการตอบสนองของสัญญาณ Output ตาม Input และค่าของ Magnetic Flux Density ในหน่วย SI

สมมติฐาน

- สัญญาณ Output Voltage จะมีค่ามากขึ้น ก็ต่อเมื่อระยะทางระหว่าง Hall Sensor และแม่เหล็กสั้นลงทั้งในกรณีข้ามเหนือและข้ามใต้หันเข้าหากันเช่นเชอร์
- สัญญาณ Output Voltage จะมีค่ามากขึ้น ก็ต่อเมื่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ทั้งในกรณีข้ามเหนือและข้ามใต้หันเข้าหากันเช่นเชอร์
- Magnetic Field Shielding จะส่งผลให้ค่า Output Voltage ลดลงทั้งในกรณีข้ามเหนือและข้ามใต้หันเข้าหากันเชอร์
- ตำแหน่งของการติดตั้งของ Magnetic Field Shield ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลง Output Voltage

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ระยะทางระหว่างเช็นเชอร์และแม่เหล็ก

ตัวแปรตาม: Output Voltage (V_{OUT})

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, แม่เหล็ก, เช็นเชอร์, อุณหภูมิโดยรอบ, ชุดการทดลอง และไมโครคอนโทรลเลอร์

นิยามเชิงปฏิบัติการ

Output Voltage (V_{OUT})	คือ	แรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่ได้จากการซีนเซอร์ มีหน่วยเป็น โวลต์ ($Volt, V$)
Offset Voltage (V_{OS})	คือ	ครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเข้าจากแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น โวลต์ ($Volt, V$)
Power Supply Voltage (V_{CC})	คือ	แรงดันไฟฟ้าเข้าจากแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น โวลต์ ($Volt, V$)
Magnetic Flux Density (B)	คือ	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก หรือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งนิยามโดยจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อเมตรกำลังสอง (Wb/m^2) หรือTesla ($Tesla, T$)
Magnetic Flux Direction	คือ	ทิศทางการไหลเวียนของฟลักซ์แม่เหล็ก มีตัวดำเนินการของ Magnetic Flux Density หรือค่าบวกค่าลบเป็นตัวระบุทิศทาง สิบเนื้องไปยังการระบุประเภทขั้วของแม่เหล็กทราบที่ซึ่งเข้าหากันบนของเซ็นเซอร์
Magnetic Response	คือ	การตอบสนองของวัตถุ หรือระบบนั้นาต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยในการทดลอง คือ Output voltage
Magnetic Field Shielding	คือ	การป้องกัน หรือลดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กอื่นที่อยู่ในบริเวณมารบกวน โดยใช้รัศดุหรือเทคนิคต่างๆ เพื่อเบียงเบนหรือดูดซับเส้นสนามแม่เหล็ก โดยในการทดลอง คือ แผ่นเหล็ก
Linear range of output voltage (V_L)	คือ	ช่วงที่ Output Voltage มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับ Magnetic Flux Density อีกทั้งยังแปรผันตรงซึ่งกันและกัน มีหน่วยเป็น โวลต์ ($Volt, V$)
Sensitivity Linearity	คือ	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Output Voltage กับ Magnetic Flux Density เป็นรูปแบบเส้นตรงในช่วงเฉพาะของ Linear range of output voltage เพื่ออธิบายความแม่นยำของเซ็นเซอร์
Quiescent Voltage (V_Q)	คือ	แรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการใช้สัญญาณอินพุต
Sensitivity (S)	คือ	ความละเอียดของเซ็นเซอร์ หรือ Output Voltage ที่เปลี่ยนแปลงไปใน 1 หน่วย Magnetic Flux Density มีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ต่อมิลลิเทสลา (mV/mT)
Sensitivity temperature compensation for magnets (S_{TC})	คือ	ความละเอียดที่บ่งชี้การแปรผันของ Magnetic Flux Density จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น ปรอทเซ็นต์ต่อองศาเซลเซียส ($\%/\text{ }^\circ\text{C}$)

นิยามเชิงปฏิบัติการ (ต่อ)

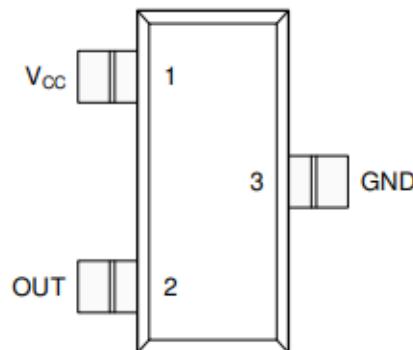
Operating Ambient Temperature (T_A)	คือ อุณหภูมิโดยรอบที่เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
Gap Distance (X)	คือ ระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร มีหน่วยเป็น เมตร (m)
Hall Voltage (V_H)	คือ ความต่างศักย์ของแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น โวลต์ ($Volt, V$)
Active Area	คือ อาณาบริเวณที่ Hall Effect Sensor สามารถรับรู้ถึงสนามแม่เหล็กได้
Magnetic Sensing Range (B_L)	คือ ช่วงความไวของแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้น มีหน่วยเป็น มิลลิเทสลา ($milliTesla, mT$)
เซ็นเซอร์	คือ อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่สำหรับตรวจจับปริมาณ และสิ่งต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า
Hall Sensor	คือ DRV5055A4Z4 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
แม่เหล็ก	คือ แม่เหล็กถาวรทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.7 มิลลิเมตร สูง 7.7 มิลลิเมตร
ชุดการทดลอง	คือ MagneticXplorer เป็นฐานที่มีความสามารถในการบรรจุบอร์ดควบคุม Breadboard, DRV5055, 3D-Print ใช้สำหรับการปรับระยะระหว่างแม่เหล็ก ถาวรกับเซ็นเซอร์
ไมโครคอนโทรลเลอร์	คือ Nucleo-STM32G474RE เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล STM32
สายจัมเปอร์	คือ สายไฟฟ้า หรือกลุ่มสายในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อหรือพินที่ปลายแต่ละด้าน
แผ่นเหล็ก	คือ วัสดุสำหรับการ Shielding มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 14.5 มิลลิเมตร ยาว 15.4 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
ขา 1	คือ ขาสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้าหรือ V_{CC}
ขา 2	คือ ขาสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกหรือ OUT
ขา 3	คือ ขาสำหรับเทียบแรงดันไฟฟ้าหรือ GND
ส่วนการทดลอง	คือ 3D-Print ใช้สำหรับการปรับระยะระหว่างแม่เหล็กถาวรกับ Hall Effect Sensor
สกรูปรับระดับ	คือ สกรูที่ใช้สำหรับการปรับระดับ เป็นองค์ประกอบในส่วนการทดลอง
ข้อมูลดิบ	คือ ข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการเก็บค่าจากเซ็นเซอร์โดยตรง

นิยามคําพท์เฉพาะ

แปรผันตรง	คือ ความสัมพันธ์ระหว่างของสองสิ่งหรือปริมาณสองปริมาณ เมื่อสิ่งหนึ่งเพิ่มขึ้น ก็สิ่งหนึ่งก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเป็นสัดส่วนกัน หรือเมื่อสิ่งหนึ่งลดลง ก็สิ่งหนึ่งก็ลดลงตามไปด้วยอย่างเป็นสัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันตามกัน หรือ การแปรผันตรง หรือ เป็นสัดส่วนโดยตรง
แปรผกผัน	คือ เป็นความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณสองปริมาณ เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่มขึ้น อีกปริมาณหนึ่ง จะลดลงอย่างได้สัดส่วนกัน หรือเมื่อปริมาณหนึ่งลดลง อีกปริมาณหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นอย่างได้สัดส่วนกัน
Exponential	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบทวีคูณหรือเป็นกราฟเลขชี้กำลัง
Linear	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

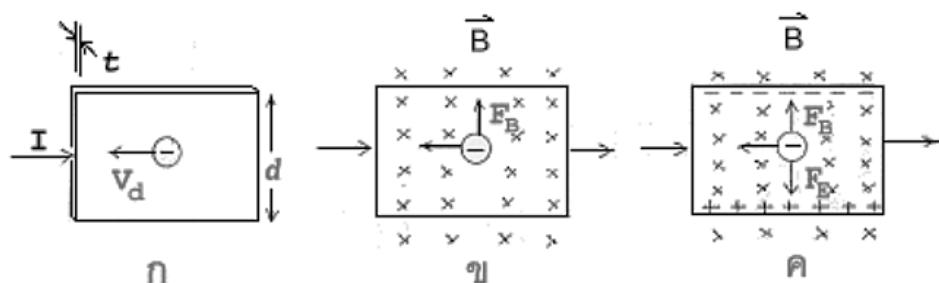


รูปที่ 1 DRV5055A4Z4 DBZ Package 3-Pin SOT-23 Top View

ที่มา: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf>

Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor หรือเรียกสั้นๆว่า Hall Sensor เป็นเซ็นเซอร์ที่มีหน้าที่วัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและให้สัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้า เนื่องด้วย Hall Sensor มีขอบเขตการทำงาน จึงเป็นเซ็นเซอร์พื้นฐานที่มีความสำคัญในการวัด และตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุระยะใกล้ เพื่อตอบสนองการใช้งานที่แตกต่างกัน ทั้งในงานด้านอุตสาหกรรม การควบคุมอัตโนมัติ โทรศัพท์มือถือ และอุตสาหกรรมรถยนต์

2. Hall Effect

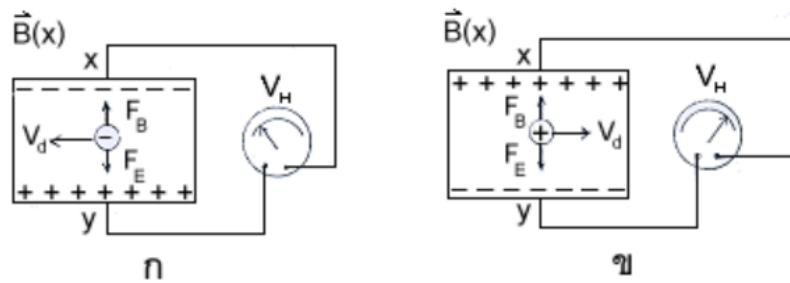


รูปที่ 2 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

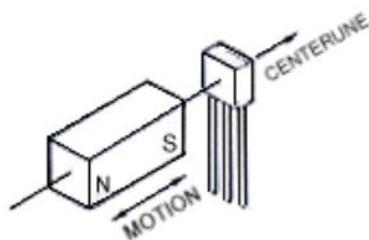
ที่มา: <https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/snet3/saowalak/hall/hall.html>

Hall Effect หรือปรากฏการณ์ฮอลล์ เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปทางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเดินทางไปจากแนวทางเดิมได้ และการเดินทางนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3. หลักการทำงานของ Hall Sensor



รูปที่ 3 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์



รูปที่ 4 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ที่มา: <https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/snet3/saowalak/hall/hall.html>

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 3.3 - 5 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และใช้ Simulink Block แปลงจากค่าดิจิตัล 12 บิต เป็น V_{OUT} ที่ถูกต้องจะแสดงค่าประมาณ 1.65 โวลต์ หรือเป็น V_{OS} ค่านี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อ กับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณคงที่ของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง หรือ $V_{CC}/2$ เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้ Active Area ของ Hall Sensor ค่า V_{OUT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางการให้ผลลัพธ์เมื่อแม่เหล็ก จากนั้นผ่านวงจรเบรียบเทียบแรงดันและวงจรขยายสัญญาณ V_{OUT} เพื่อให้มีสเกลที่ง่ายต่อการสังเกต โดยลักษณะค่าของ V_{OUT} ถ้านำเข้าใกล้ V_{OUT} จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำเข้าใกล้ V_{OUT} จะมีค่าลดลง V_{OUT} ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

4.Datasheet และข้อมูลโดยคร่าวของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ที่ใช้ในการทดลอง

4.1 DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor datasheet (Rev. B)



DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor

1 Features

- Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
- Operates From 3.3-V and 5-V Power Supplies
- Analog Output With V_{CC} / 2 Quiescent Offset
- Magnetic Sensitivity Options (At $V_{CC} = 5$ V):
 - A1/Z1: 100 mV/mT, ± 21 -mT Range
 - A2/Z2: 50 mV/mT, ± 42 -mT Range
 - A3/Z3: 25 mV/mT, ± 85 -mT Range
 - A4/Z4: 12.5 mV/mT, ± 169 -mT Range
- Fast 20-kHz Sensing Bandwidth
- Low-Noise Output With ± 1 -mA Drive
- Compensation For Magnet Temperature Drift for A1/A2/A3/A4 Versions and None for Z1/Z2/Z3/Z4 Versions
- Standard Industry Packages:
 - Surface-Mount SOT-23
 - Through-Hole TO-92

2 Applications

- Precise Position Sensing
- Industrial Automation and Robotics
- Home Appliances
- Gamepads, Pedals, Keyboards, Triggers
- Height Leveling, Tilt and Weight Measurement
- Fluid Flow Rate Measurement
- Medical Devices
- Absolute Angle Encoding
- Current Sensing

3 Description

The DRV5055 is a linear Hall effect sensor that responds proportionally to magnetic flux density. The device can be used for accurate position sensing in a wide range of applications.

The device operates from 3.3-V or 5-V power supplies. When no magnetic field is present, the analog output drives half of V_{CC} . The output changes linearly with the applied magnetic flux density, and four sensitivity options enable maximal output voltage swing based on the required sensing range. North and south magnetic poles produce unique voltages.

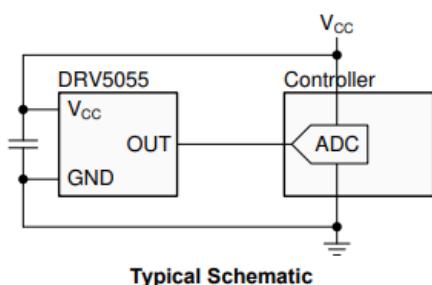
Magnetic flux perpendicular to the top of the package is sensed, and the two package options provide different sensing directions.

The device uses a ratiometric architecture that can eliminate error from V_{CC} tolerance when the external analog-to-digital converter (ADC) uses the same V_{CC} for its reference. Additionally, the device features magnet temperature compensation to counteract how magnets drift for linear performance across a wide –40°C to 125°C temperature range. Device options for no temperature compensation of magnet drift are also available.

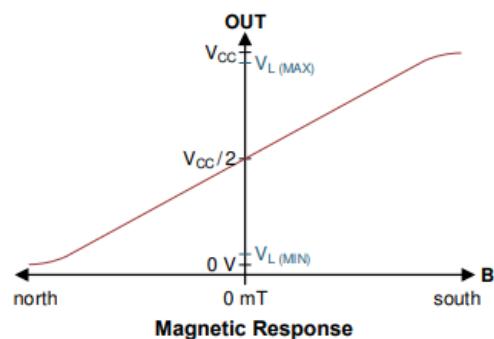
Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV5055	SOT-23 (3)	2.92 mm × 1.30 mm
	TO-92 (3)	4.00 mm × 3.15 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



Typical Schematic



Magnetic Response

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
Power supply voltage	V_{CC}	-0.3	7	V
Output voltage	V_{OUT}	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	V
Magnetic flux density, B_{MAX}		Unlimited		
Operating junction temperature, T_J		-40	170	°C
Storage temperature, T_{STG}		-65	150	°C

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT
V _{CC}	Power-supply voltage ⁽¹⁾	3	3.63	V
		4.5	5.5	
I _O	Output continuous current	-1	1	mA
T _A	Operating ambient temperature ⁽²⁾	-40	125	°C

(1) There are two isolated operating V_{CC} ranges. For more information see the [Operating V_{CC} Ranges](#) section.

(2) Power dissipation and thermal limits must be observed.

6.6 Magnetic Characteristics

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

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

7.3 Feature Description

7.3.1 Magnetic Flux Direction

As shown in [Figure 7-1](#), the DRV5055 is sensitive to the magnetic field component that is perpendicular to the top of the package.

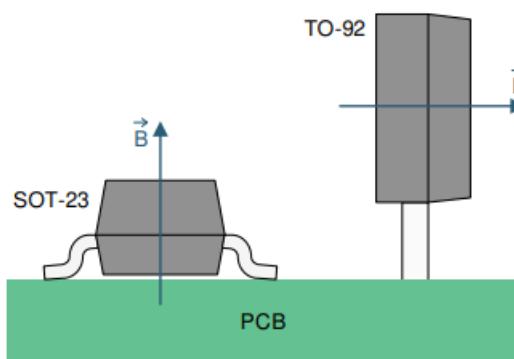


Figure 7-1. Direction of Sensitivity

วิธีดำเนินการทดลอง

- ติดตั้งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ลงบน ชุดการทดลองตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
- เสียบสายจัมเปอร์จาก Ground ของชุดการทดลองเข้าขาที่ 3 ของ Hall Sensor
- เสียบสายจัมเปอร์จาก Pin A0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าขาที่ 2 ของ Hall Sensor
- เสียบสายจัมเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของชุดการทดลองเข้าขาที่ 1 ของ Hall Sensor
- หมุนน็อตปรับระดับของชุดการทดลอง โดยเริ่มต้นจาก 0 มิลลิเมตรจนถึง 35 มิลลิเมตรเป็นตำแหน่งสุดท้าย ปรับทีละ 1 มิลลิเมตร และเก็บค่าตำแหน่งละ 10 วินาที
- บันทึกค่าแรงดันข้าอกหรือ V_{OUT} ทุกๆครั้งที่มีการปรับระดับเป็นเวลา 10 วินาที หรือ 1000 ค่า (ปรับ Fixed-step size เท่ากับ 0.01) ต่อ 1 ตำแหน่งจาก Hall Effect Sensor เพื่อนำมาทำการเฉลี่ยค่า และนำข้อมูลดิบไปใช้

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	DRV5055Z4 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor	1	อัน
2	แม่เหล็กถาวร	1	อัน
3	Nucleo STM32G474RE	1	บอร์ด
4	บอร์ดทดลอง MagneticXplorer	1	บอร์ด
5	สายอัปโหลด	1	เส้น
6	สายจัมเปอร์ผู้-เมีย ความยาว 20 เซนติเมตร	3	เส้น

ตารางที่ 1 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Hall Sensor
- วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ได้ดังนี้
 - การทดลองเพื่อดูความสัมพันธ์ของ V_{OUT} (ตัวแปรตาม) กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร (ตัวแปรต้น) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มี Shield และมี Shield สลับข้างหน้าและข้างใต้
- ทำการทดลองเพื่อสรุปผลว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดมีลักษณะเป็นอย่างไร
- นำข้อมูลดิบที่ได้ไปสังเคราะห์เป็นข้อมูลที่พร้อมใช้งาน เพื่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
- สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

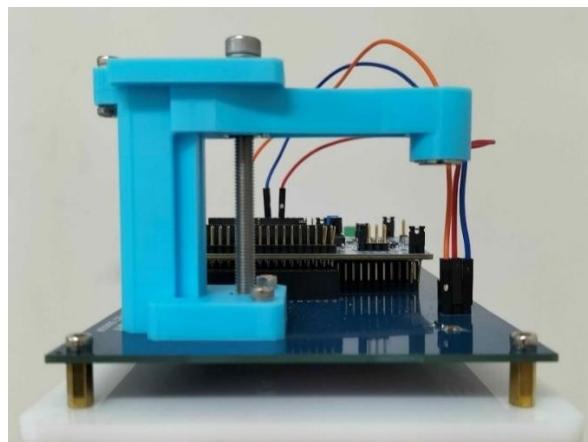
การทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา Output Voltage (V_{OUT}) ต่อระยะเวลาห่างเข็นเชอร์และแม่เหล็ก การ และดูข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงแบบ Real-Time บน Data Inspector โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่นๆ เริ่มจากการนำข้อมูลที่เป็น Analog อย่าง Output Voltage ที่ได้จากการเก็บผลใน 1000 ค่า มาทำ การหาค่า V_{RMS} เพื่อให้ค่ามีความถูกต้องก่อนที่จะมาทำการคำนวนต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

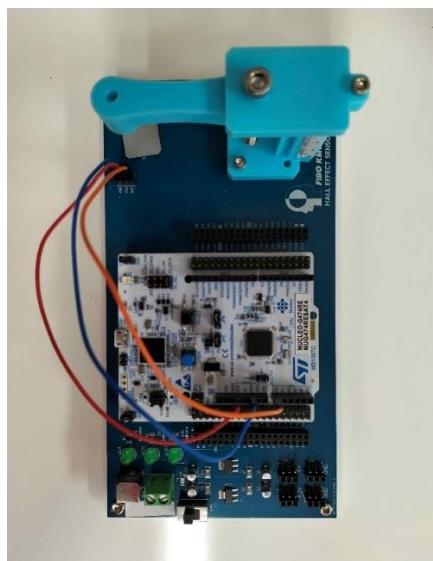
การแปลงค่า Root Mean Square Voltage

```
V_out = rms(RAW_DATA.Data(:,1)); % แปลงค่า Vrms (RAW_DATA คือตำแหน่งสำหรับใส่ข้อมูล .mat ที่เก็บมา)
```

Code ที่ 1 collect_data.m ไฟล์สำหรับแปลงค่า Analog Voltage เป็น Root Mean Square Voltage และเก็บข้อมูล

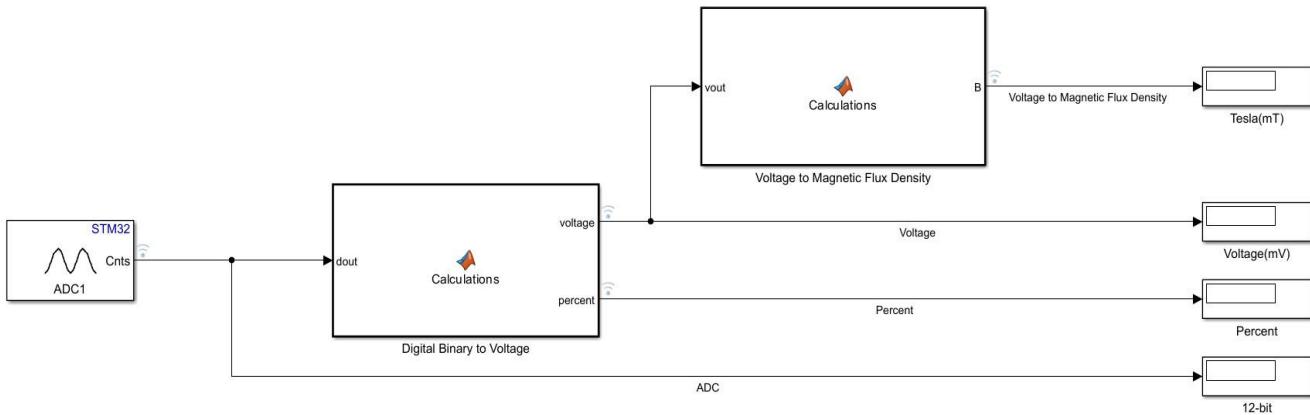


รูปที่ 5 รูปด้านข้างชุดทดลอง แสดงส่วนการทดลอง (3D-Printer)



รูปที่ 6 รูปด้านบนชุดทดลอง

เทคนิคที่ใช้ในการทำการทดลอง



รูปที่ 7 LAB_1.slx หรือ Simulink สำหรับการเก็บค่าและแปลงค่าของ Hall Sensor

```

function [voltage, percent] = Calculations(dout)

vin = double(dout)/(2^12 - 1)*3.3; % (Digital Output / จำนวนบิต-1)*Reference Voltage
voltage = double(vin)*1000; % แปลง Volts เป็น milliVolts
percent = (double(vin)/3.3)*100; % (Input Voltage / 3.3)*100

end
  
```

Code ที่ 2 Digital Binary To Voltage (MATLAB Function Block ใน Simulink)

ใช้สำหรับการแปลงค่าจาก 12-บิต (ADC Block) เป็น Output Voltage (V_{OUT}) และ Percent (%) ซึ่ง V_{OUT} จะถูกนำไปแปลงเป็น Magnetic Flux Density ในการสังเคราะห์ค่าต่อไป

```

function B = Calculations(vout)

% คำนวนหา Magnetic flux density (B)
% Output Voltage = V_Q + B * (Sensitivity * (1 + S_TC * (T_A - 25)))
raw_B = (double(vout/1000) - 1.650) / (7.5 * (1 + 0.0012 * (25 - 25)));
B = raw_B * 1000;

end
  
```

Code ที่ 3 Voltage to Magnetic Flux Density (MATLAB Function Block ใน Simulink)

ใช้สำหรับการแปลงค่าจาก V_{OUT} เป็น Magnetic Flux Density มาจากสูตรใน DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor datasheet (Rev. B) ซึ่งเป็น Datasheet ที่ใช้ในการอ้างอิงการคำนวณดังนี้

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

จัดรูปสมการจะได้

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

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ตัวแปรควบคุม) หรือ $T_A = 25^{\circ}C$

$$B = \frac{V_{OUT} - V_Q}{(Sensitivity_{(25^{\circ}C)} \times (1 + S_{TC} \times (0^{\circ}C)))}$$

ทำให้พจน์ที่คุณเก็บ Sensitivity มีค่าเป็น 1 ส่งผลให้สมการสุดท้ายเป็นดังนี้

$$B = \frac{V_{OUT} - V_Q}{Sensitivity_{(25^{\circ}C)}}$$

จากนั้นทำการเก็บข้อมูลดิบทั้งหมด 4 ชุดดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของ V_{OUT} (ตัวแปรตาม) กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร (ตัวแปรต้น) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มี Shield ลับข้าวเหนียว
2. ความสัมพันธ์ของ V_{OUT} (ตัวแปรตาม) กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร (ตัวแปรต้น) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มี Shield ลับข้าวใต้
3. ความสัมพันธ์ของ V_{OUT} (ตัวแปรตาม) กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร (ตัวแปรต้น) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มี Shield ลับข้าวเหนียว
4. ความสัมพันธ์ของ V_{OUT} (ตัวแปรตาม) กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร (ตัวแปรต้น) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มี Shield ลับข้าวใต้

การนำผลการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการสร้างกราฟโดย MATLAB 2024b

เขียนโค้ดสร้างกราฟ เพื่อให้สามารถเปลี่ยนตัวแปรที่จะใช้ในการแสดงกราฟได้ง่าย สะดวก และตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน

```
linecolor_b = [0 0.4470 0.7410]; % กำหนดสีเพื่อแสดงความขัดเจนของเส้นกราฟ
linecolor_r = [0.6350 0.0780 0.1840];
linecolor_g = [0.4660 0.6740 0.1880];

figure;

x1 = (-35:1:0)';
plot(x1, valNNS, '--o', 'Color', linecolor_b, 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 2,
'MarkerFaceColor', linecolor_b); % วาดกราฟเส้น
hold on; % คงกราฟไว้
plot(x1, valNS, '-o', 'Color', linecolor_b, 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 2,
'MarkerFaceColor', linecolor_b);

x2 = (0:1:35)';
plot(x2, flip(valSNS), '--o', 'Color', linecolor_r, 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 2,
'MarkerFaceColor', linecolor_r);
plot(x2, flip(valSS), '-o', 'Color', linecolor_r, 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 2,
'MarkerFaceColor', linecolor_r);

legend(["North No Shield", "North Shield", "North Shield Ground Setup", "South Shield
Ground Setup", "South No Shield", "South Shield"], 'Location', 'southeast'); % สร้าง
คำอธิบายของกราฟ

xticks(-35:5:35);
xticklabels({"0 (N)", "5", "10", "15", "20", "25", "30", "35", "30", "25", "20", "15",
"10", "5", "0 (S)"}); % กำหนดตำแหน่งและข้อความของ X-ticks
yticks(0:250:3500); % กำหนดตำแหน่งของ Y-ticks

xlabel('Distance (mm)'); % ตั้งชื่อแกน X
ylabel('Output Voltage (mV)'); % ตั้งชื่อแกน Y
title('Output Voltage Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South
Poles'); % ตั้งชื่อกราฟ

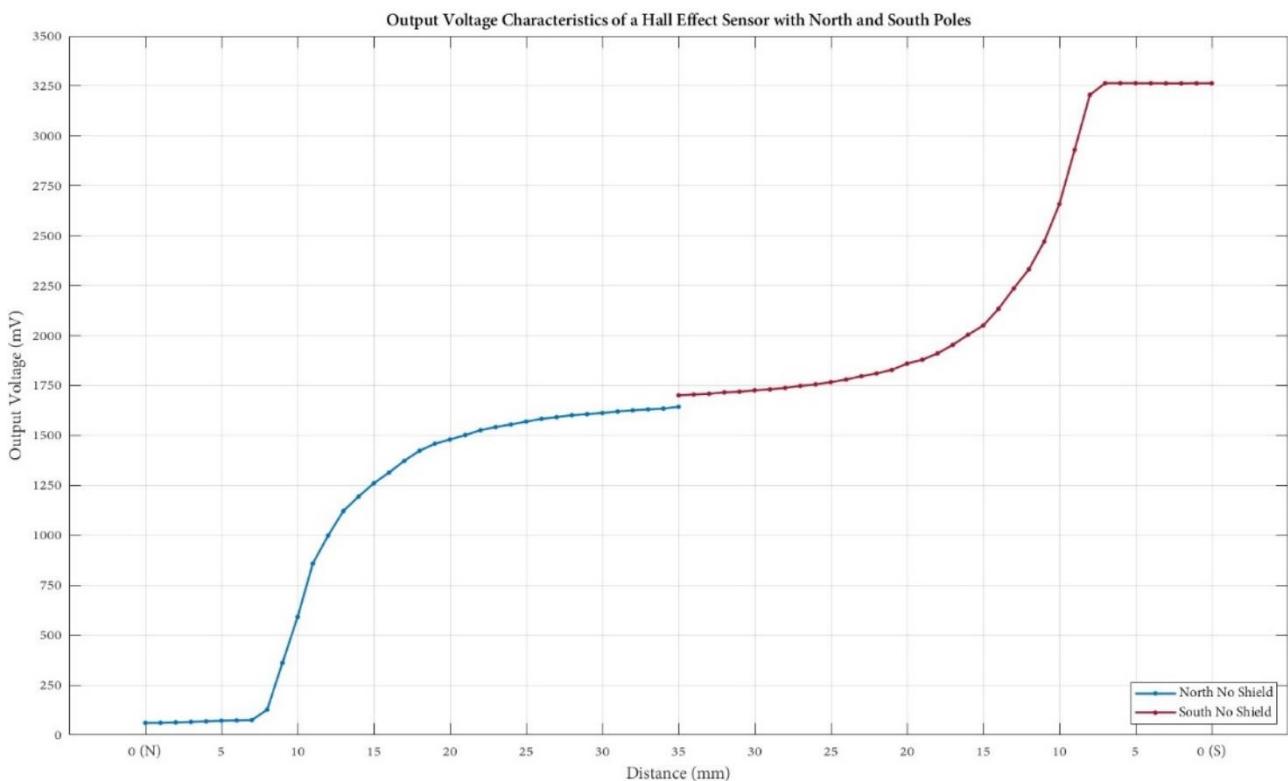
hold off;
grid on; % เปิดใช้งานตารางในกราฟ
```

Code ที่ 4 plot_magnetic.m ไฟล์สร้างกราฟเพื่อการแสดงผล

ผลการทดลอง

เมื่อเก็บค่าครบถ้วนแล้ว จึงนำมาทำกราฟ ด้วยการเขียนบรรยายถึงลักษณะของกราฟ และค่าในแต่ละช่วงที่สนใจของตัวแปรต้น และตัวแปรตาม เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่างๆ ตอบสมมติฐาน และจุดประสงค์การเรียนรู้ โดยแบ่งออกเป็น 4 กราฟดังต่อไปนี้

กราฟ Output Voltage Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles



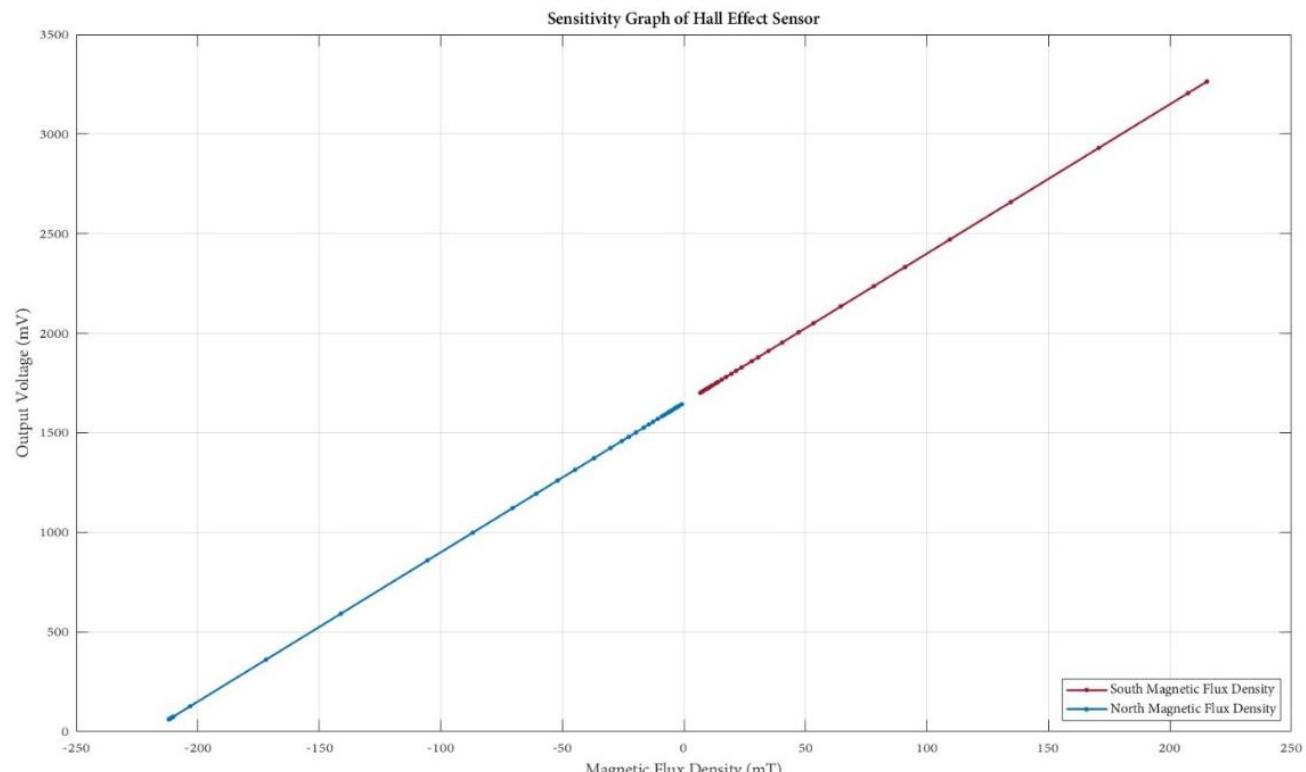
รูปที่ 8 กราฟ Output Voltage Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากเส้นกราฟ South No Shield ที่ปรากฏ เมื่อหันข้ามกันจะเห็นว่าเมื่อยกหัวเซ็นเซอร์ ช่วงแรกเริ่มจากระยะห่าง 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1700.68 มิลลิโวลต์ถึง 1725.97 มิลลิโวลต์และจะมีช่วงที่ไม่ต่อเนื่องกันของกราฟใกล้ตำแหน่ง 35 มิลลิเมตร ในช่วงที่สองเริ่มจากระยะห่าง 29 มิลลิเมตรจนถึง 8 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1730.60 มิลลิโวลต์จนถึง 3205.29 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 7 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 3263.98 ถึง 3263.39 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear ดังเส้นกราฟ South No Shield ที่ปรากฏ

จากเส้นกราฟ North No Shield ที่ปรากฏ เมื่อหันข้ามกันจะเห็นว่าเมื่อยกหัวเซ็นเซอร์ ช่วงแรกเริ่มจากระยะห่าง 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1643.57 มิลลิโวลต์ถึง 1612.57 มิลลิ

โอลต์และจะมีช่วงที่ไม่ต่อเนื่องกันของกราฟเกล็ต์สำหรับ 35 มิลลิเมตร ในช่วงที่สองเริ่มจากระยะห่าง 29 มิลลิเมตร จนถึง 8 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าข้าออกประมาณ 1606.61 มิลลิโวลต์ถึง 127.08 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 7 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าข้าออกประมาณ 75.14 มิลลิโวลต์ถึง 61.10 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear

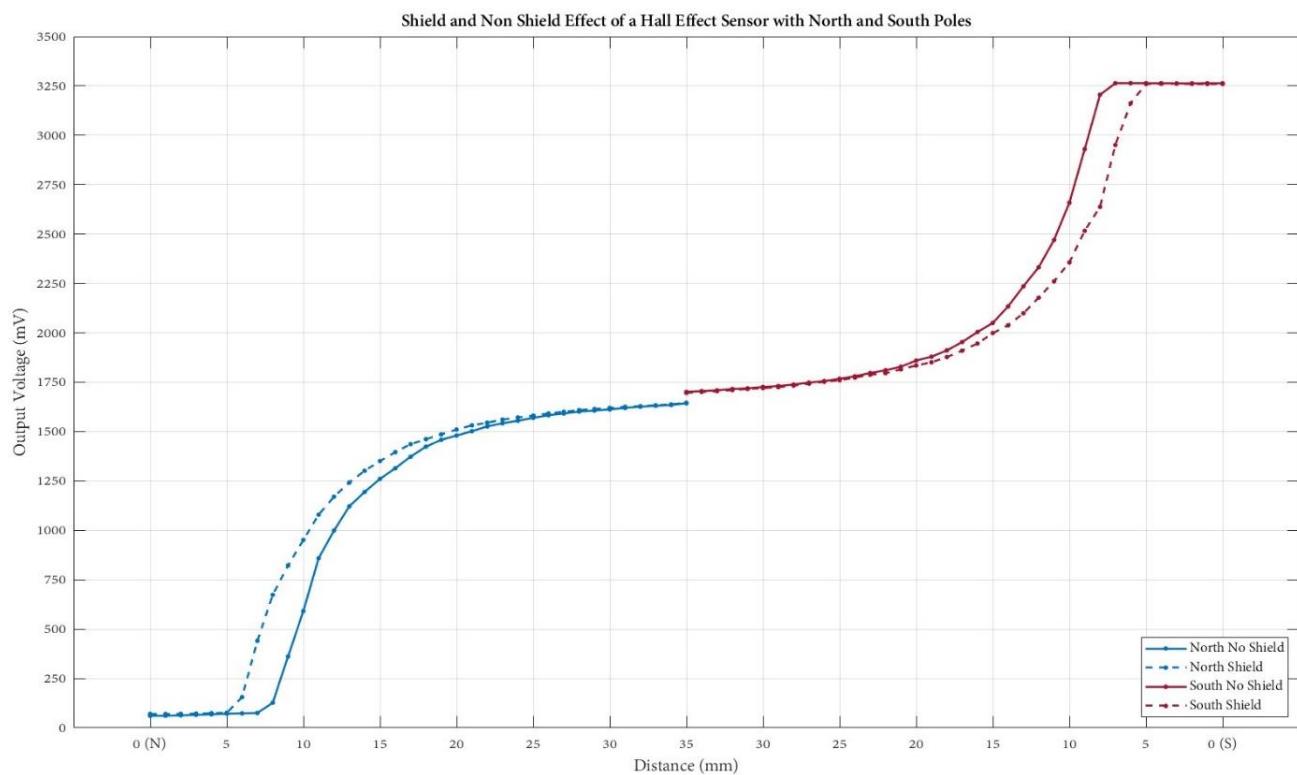
กราฟ Magnetic Flux Density Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles



รูปที่ 9 กราฟ Magnetic Flux Density Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากการทดสอบ เริ่มจากตำแหน่งที่ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเป็น -211.83 มิลลิเทสลาจนถึง 215.19 มิลลิเทสลาจะมีแรงดันไฟฟ้าข้าออกประมาณ 61.10 มิลลิโวลต์และ 3263.98 มิลลิโวลต์ตามลำดับ โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่จะมีความไม่ต่อเนื่องของช่วงกราฟเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง -0.86 มิลลิเทสลาและ 6.67 มิลลิเทสลา ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าข้าออกอยู่ที่ 1643.57 มิลลิโวลต์และ 1700.68 มิลลิโวลต์ตามลำดับ

กราฟ Shield and Non Shield Effect of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

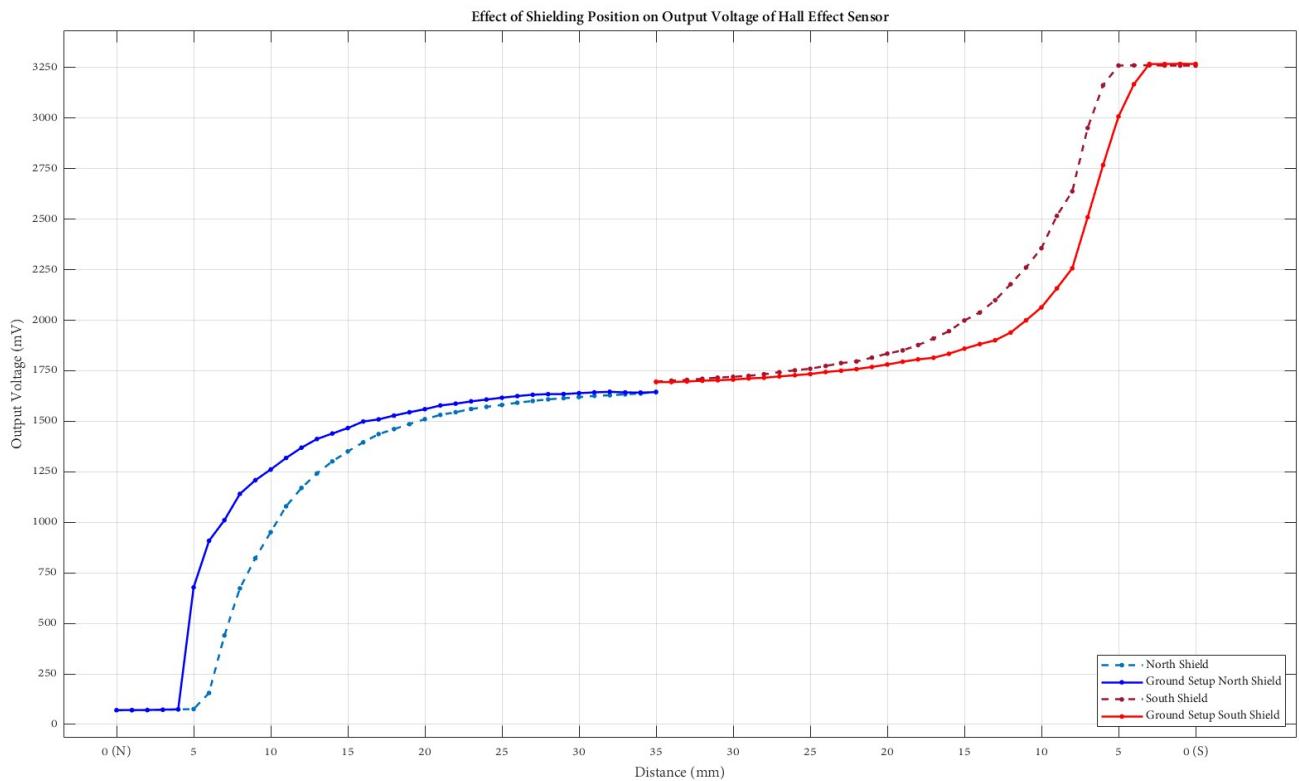


รูปที่ 10 กราฟ Shield and Non Shield Effect of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากเส้น South Shield ในช่วงแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1696.22 มิลลิโวลต์จนถึง 1720.28 มิลลิโวลต์ ในช่วงที่สองแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 29 มิลลิเมตรจนถึง 6 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1724.61 มิลลิโวลต์จนถึง 3162.57 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 5 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 3260.33 มิลลิโวลต์ถึง 3259.94 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear

จากเส้น North Shield ในช่วงแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1645.64 มิลลิโวลต์จนถึง 1619.74 มิลลิโวลต์ ในช่วงที่สองแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 29 มิลลิเมตรจนถึง 6 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 1614.11 มิลลิโวลต์จนถึง 155.65 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 5 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าออกประมาณ 76.12 มิลลิโวลต์ถึง 70.22 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear

กราฟ Effect of Shielding Position on Output Voltage of Hall Effect Sensor (เสริม)



รูปที่ 11 กราฟ Effect of Shielding Position on Output Voltage of Hall Effect Sensor

จากเส้น Ground Setup South Shield ในช่วงแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 1694.10 มิลลิโวลต์จนถึง 1706.40 มิลลิโวลต์ ในช่วงที่สองแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 29 มิลลิเมตรจนถึง 5 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 1712.07 มิลลิโวลต์จนถึง 3167.87 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 4 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 3267.82 มิลลิโวลต์ถึง 3268.13 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear

จากเส้น Ground Setup North Shield ในช่วงแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 35 มิลลิเมตรจนถึง 30 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 1644.22 มิลลิโวลต์จนถึง 1639.24 มิลลิโวลต์ ในช่วงที่สองแรกเริ่มจากตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็น 29 มิลลิเมตรจนถึง 5 มิลลิเมตร มีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 1639.66 มิลลิโวลต์จนถึง 678.17 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็น Exponential Growth ในช่วงสุดท้ายเริ่มจากระยะห่าง 4 มิลลิเมตรจนถึง 0 มิลลิเมตรจะมีแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ 75.00 มิลลิโวลต์ถึง 71.06 มิลลิโวลต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Linear

สรุปผลการทดลอง

กราฟ Output Voltage Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากการศึกษา สังเกต และเก็บผลการทดลอง สามารถเห็นได้ว่า ระยะห่างของเซนเซอร์ส่งผลต่อ V_{OUT} และความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อตำแหน่งของแม่เหล็กหันไปทางข้ามใต้เข้าใกล้เซนเซอร์ V_{OUT} จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขั้วของแม่เหล็ก ซึ่งความเข้มของสนามแม่เหล็กจะถึงจุดสูงสุดที่ระยะห่างที่กำหนดและขึ้นอยู่กับความไวของเซนเซอร์ ในกรณีนี้ V_{OUT} มีค่าไม่เกิน 3.3 โวลต์ เนื่องจากการ Saturation ของเซนเซอร์ ซึ่งเกิดจากความจำกัดของการออกแบบเซนเซอร์เอง เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มมากขึ้น V_{OUT} จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจำกัดที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ และเมื่อถึงจุดนี้ เซนเซอร์จะเข้าสู่สภาวะ Saturation ทำให้ V_{OUT} คงที่อยู่ที่ระดับสูงสุด ซึ่งหมายความว่าเซนเซอร์จะไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มากขึ้นได้อีกในขณะที่เมื่อหันข้ามเหนือเข้าหาเซนเซอร์จะส่งผลให้เกิดการตอบสนองที่ตรงกันข้าม โดยเมื่อแม่เหล็กอยู่ใกล้เซนเซอร์ ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ V_{OUT} ลดลงตามรั้งทางตามที่แสดงในกราฟข้างต้น

กราฟ Magnetic Flux Density Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากการกราฟค่าของ Magnetic Flux Density มีค่า $\pm 215 \text{ mT}$ ซึ่งเกินจากค่าใน B_L ใน Datasheet ของ DRV5055A2Z2 ซึ่งเป็น $\pm 44 \text{ mT}$ โดยเมื่ออ้างอิงจาก DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor datasheet (Rev. B) ค่าที่เกินจากการวัดผลการทดลองจะเป็นค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) ซึ่งจะทำให้เกิดการลดค่าความไว (Sensitivity Reducing) เนื่องจากในกรณีที่ไม่เกินขอบเขตของ V_L และค่า B_L ค่าจะเป็นเชิงเส้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้

กราฟ Shield and Non Shield Effect of a Hall Effect Sensor with North and South Poles

จากการศึกษา สังเกต และเก็บผลการทดลองพบว่า เมื่อข้ามใต้ของแม่เหล็กหันเข้าหาเซนเซอร์โดยมีแผ่นชีล์ดติดอยู่ที่แม่เหล็กถาวร พลักซ์แม่เหล็กจะถูกดูดซึมและเบี่ยงเบนจากคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำชีล์ด (Shield Material) ซึ่งมีความสามารถในการซึมผ่านของพลักซ์แม่เหล็กต่ำ (low-permeability) ทำให้ความหนาแน่นของพลักซ์แม่เหล็กที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ลดลง ในกรณีที่ไม่มีแผ่นชีล์ด เส้นสนามแม่เหล็กจะตรงไปยังเซนเซอร์ตามลักษณะปกติ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เซนเซอร์รับรู้มีความหนาแน่นหรือความเข้มที่สูงขึ้น เป็นผลสืบเนื่องทำให้ V_{OUT} เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงขึ้น

ในทางตรงกันข้าม เมื่อข้ามเหนือหันเข้าหาเซนเซอร์พลักซ์แม่เหล็กจะกระจายตัวออกไปตามธรรมชาติ ซึ่งทำให้ความเข้มของสนามที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ลดลง ส่งผลให้ V_{OUT} ลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อมีแผ่นชีล์ดติดกับแม่เหล็กถาวรตามการทดลองพบว่า เส้นสนามแม่เหล็กจะถูกเบี่ยงเบนและมุ่งตรงไปยังเซนเซอร์ ทำให้ความหนาแน่นของพลักซ์แม่เหล็กที่เซนเซอร์รับรู้มีความเข้มสูงขึ้น ส่งผลให้ V_{OUT} เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงขึ้น

จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหันข้ามใต้เข้าเซนเซอร์ แผ่นชีล์ดจะทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของพลักซ์แม่เหล็กที่เซนเซอร์ และเมื่อหันข้ามเหนือเข้าเซนเซอร์ แผ่นชีล์ดจะทำหน้าที่เพิ่มความหนาแน่นของพลักซ์แม่เหล็กที่เซนเซอร์ หรือแสดงผลตรงกันข้าม

กราฟ Effect of Shielding Position on Output Voltage of Hall Effect Sensor (เสริม)

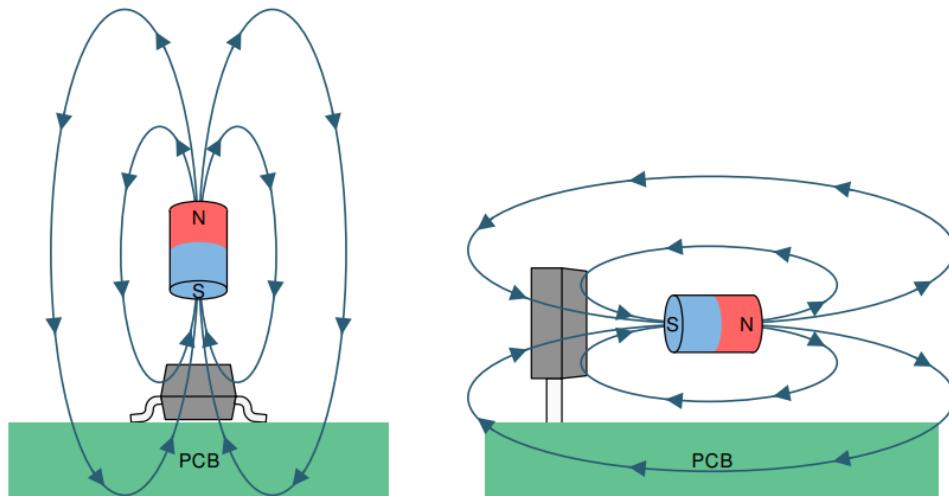
กราฟนี้เป็นกราฟจากการทดลองเสริม เนื่องจากผู้จัดทำต้องการทราบถึงผลกระทบของตำแหน่งติดตั้งของชีล์ด ซึ่งตัวแปรต้นของการทดลองนี้ คือ ตำแหน่งการติดตั้งชีล์ด โดยให้ติดตั้งชีล์ดที่แม่เหล็กถาวรทั้งข้าวเหนียวและข้าวใต้ จากนั้นติดตั้งชีล์ดที่เข็นเซอร์ทั้งข้าวเหนียวและข้าวใต้ เช่นกัน เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบจะพบว่า ตำแหน่งของการติดตั้งชีล์ดมีผลต่อ V_{OUT} อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดลองพบว่า ณ ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร (แม่เหล็กถาวรอยู่ชิดกับเข็นเซอร์) ของทั้งสองการติดตั้งให้ค่า V_{OUT} ที่ไม่แตกต่างกันอันเป็นผลมาจากการระหว่างห่างระหว่างเข็นเซอร์และแม่เหล็กถาวร แต่เมื่อมีการขยับตำแหน่งออกห่างมากขึ้นเรื่อยๆ (ที่ละ 1 มิลลิเมตร) การติดตั้งในรูปแบบที่แตกต่างกันเริ่มส่งผลต่อ V_{OUT} อย่างชัดเจน โดยจากการข้างต้นการติดตั้งชีล์ดที่ตำแหน่งเข็นเซอร์ (Ground Setup) ส่งผลให้ V_{OUT} มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการติดตั้งที่แม่เหล็กถาวร ในกรณีที่ข้าวใต้หันเข้าหาเข็นเซอร์ และในทางกลับกัน V_{OUT} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อข้าวเหนียวมีทิศหันเข้าหาเข็นเซอร์ แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งชีล์ดที่เข็นเซอร์ อาจส่งผลต่อการการผ่านของฟลักซ์แม่เหล็ก และเมื่อดูจากราฟจะสังเกตได้ว่าการติดตั้งใกล้กับเข็นเซอร์ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดค่า V_{OUT} ทั้งในข้าวเหนียว และข้าวใต้โดยให้ค่า V_{OUT} ที่สูงขึ้นในเชิงประสิทธิภาพ

จึงสรุปได้ว่าการติดตั้ง ณ ตำแหน่งเข็นเซอร์ เมื่อข้าวเหนียวหันเข้าหาเข็นเซอร์จะส่งผลให้ V_{OUT} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงขึ้น และเมื่อข้าวใต้หันเข้าหาเข็นเซอร์จะส่งผลให้ V_{OUT} มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและน้อยลง โดยทั้งสองเป็นผลสืบเนื่องจากจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่ไฟล์ผ่านชีล์ดก่อนจะถึงเข็นเซอร์ ซึ่งให้ค่า V_{OUT} ที่มากขึ้นในเชิงของผลกระทบ

อภิรายผล

สัญญาณ Output Voltage จะมีค่ามากขึ้น ก็ต่อเมื่อระยะทางระหว่าง Hall Sensor น้อยลงและแม่เหล็กทั้งในกรณีข้าวเหนือและข้าวใต้หันเข้าหาเช็นเซอร์



รูปที่ 12 The Flux Direction for Positive B จาก datasheet

จากการวิเคราะห์กราฟ Output Voltage Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles (กราฟที่ 1 ในผลการทดลอง) เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ Output Voltage และระยะทางระหว่าง Hall Sensor และแม่เหล็ก สามารถอภิรายได้ว่าสัญญาณ Output Voltage จะแปรผันกับระยะทางระหว่าง Hall Sensor ในกรณีที่ข้าวใต้หันเข้าหาเช็นเซอร์ เนื่องจากทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็กหรือ Magnetic Flux Direction กล่าวคือ หลักการทำงานเชิงลึกของ Hall Sensor คือ เมื่อสนามแม่เหล็กพุ่งออกจากข้าวเหนือ ผ่านทางด้านล่างของ เช็นเซอร์ จะทำให้เกิด Lorentz Force และ Hall Effect ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความต่างศักย์บันแ奮ต์วันนำบาง จากนั้น จะทำให้วงจรเปรียบเทียบหรือ Comparator เกิดการปล่อย Supply Voltage ออกมาในกรณีคือปล่อย Low Voltage และผ่านวงจรขยายสัญญาณหรือ Amplifier และส่ง Output Voltage ออกมาอย่างที่ผู้สังเกตุกรณ์เห็น ซึ่ง ในทางกลับกันสัญญาณ Output Voltage จะแปรผันตรงกับระยะทางระหว่าง Hall Sensor ในกรณีที่ข้าวเหนือหันเข้าหาเช็นเซอร์ด้วยทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็กที่กลับทิศ

สัญญาณ Output Voltage จะมีค่ามากขึ้น ก็ต่อเมื่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ทั้งในกรณีข้าวเหนือและข้าวใต้หันเข้าหาเซ็นเซอร์

จากการวิเคราะห์กราฟ Magnetic Flux Density Characteristics of a Hall Effect Sensor with North and South Poles (กราฟที่ 2 ในผลการทดลอง) เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ Output Voltage และ Magnetic Flux Density ลักษณะของกราฟเป็นรูปแบบเส้นตรง หมายความว่า ตามอุดมคติแล้วค่า Output Voltage และ Magnetic Flux Density จะแปรผันตรงกัน แต่ในความเป็นจริงความสัมพันธ์นี้จะไม่แปรผันตรงกันเสมอไป เนื่องจาก การถูกกำหนดโดย Supply Voltage ของ V_{CC} ทำให้ค่าของ Output Voltage เกิดการ Saturated ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดกรณีอุดมคติได้

Magnetic Field Shielding จะส่งผลให้ค่า Output Voltage ลดลงทั้งในกรณีข้าวเหนือและข้าวใต้หันเข้าหาเซ็นเซอร์

จากการวิเคราะห์กราฟ Shield and Non Shield Effect of a Hall Effect Sensor with North and South Poles (กราฟที่ 3 ในผลการทดลอง) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ Magnetic Field Shielding ที่ส่งผลต่อ Output Voltage ทำให้ทราบว่าในกรณีที่หันข้าวใต้เข้าหาเซ็นเซอร์โดยมี Magnetic Field Shielding ส่งผลให้ค่า Output Voltage ลดลง และในทางกลับกันกรณีที่หันข้าวใต้เข้าหาเซ็นเซอร์โดยมี Magnetic Field Shielding ส่งผลให้ค่า Output Voltage เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในช่วงที่เป็น Exponential ของกราฟทั้งสองจะสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน

ตำแหน่งของการติดตั้งของ Magnetic Field Shield ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลง Output Voltage

จากการวิเคราะห์กราฟ Effect of Shielding Position on Output Voltage of Hall Effect Sensor (กราฟที่ 4 ในผลการทดลอง) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ Magnetic Field Shielding ที่ส่งผลต่อ Output Voltage ในตำแหน่ง การติดตั้งที่ต่างกัน ทำให้ทราบว่าการติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิด Output Voltage ที่ต่างกันได้ โดยสามารถสรุปผลในขอบเขตของการทดลองที่มีการติดตั้งที่ตำแหน่งเซ็นเซอร์และตำแหน่งแม่เหล็กได้ว่า การติดตั้งที่เซ็นเซอร์ส่งผลมากกว่าในเชิงของผลกระทบต่อ Output Voltage กล่าวคือ ในกรณีที่หันข้าวใต้เข้าหาเซ็นเซอร์ค่า Output Voltage จะมีค่าลดลงที่มากกว่าเมื่อติดอยู่ที่ตำแหน่งเซ็นเซอร์ และในกรณีที่หันข้าวเหนือเข้าหาเซ็นเซอร์ค่า Output Voltage จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่มากกว่าเมื่อติดอยู่ที่ตำแหน่งเซ็นเซอร์

ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการทดลองพบเจอบัญหาทั้งสิ้น 2 ข้อ (ความคิดเห็นส่วนตัวของทางผู้จัดทำ)

1. ส่วนทดลองมีสกรูปรับระดับที่มีระยะจำกัด เนื่องจากระยะที่จำกัดนี้ส่งผลกระทบโดยตรงกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้ไม่สามารถให้ระยะที่เกณฑ์ของจากนี้ได้ ผู้จัดทำจึงต้องการเสนอแนะว่าให้มีการเพิ่มระยะที่สามารถทำให้ค่าของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสามารถไปถึงจุดที่ Output Voltage จะเกิดการ Saturated ดังในกราฟของ datasheet เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน
2. การทดลอง Magnetic Field Shielding ควรจะมีการทดลองที่กำหนดถึงจุดประสงค์มากกว่านี้ เนื่องทางผู้จัดทำคิดว่าการให้จุดประสงค์การเรียนรู้ของการทดลอง Magnetic Field Shielding สามารถเพิ่มความชัดเจนและจุดประสงค์มากกว่านี้ได้ อาทิ ต้องการให้นักศึกษารู้ถึงตำแหน่งการติดตั้ง Shield ที่เหมาะสมต่อการสภาพแวดล้อมที่กำหนด เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน Shield เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริง

Incremental Encoder

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาและอธิบายหลักการทำงานและลักษณะสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder ได้ รวมถึง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลง และสามารถคำนวณ Pulses Per Revolution และ Resolution ได้
- เพื่อศึกษาและอธิบายการตั้งค่า Parameter ใน IOC รวมถึงการ config การตั้งค่าที่สำคัญในการใช้งาน Incremental Encoder และสามารถอ่านค่าสัญญาณจาก Quadrature Encoder (QEI) และ Polling Method
- เพื่อเขียนโปรแกรมใน MATLAB และ Simulink ให้แสดงผลสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder แบบ Real-Time ผ่านบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยแสดงค่าตัวแปรทางกายภาพ เช่น Raw Signal, Angular Position, และ Angular Velocity ในหน่วย SI
- เพื่อให้สามารถอ่านค่า Raw Signal จาก QEI Method และแปลงค่าเป็น Relative Position (pulses) ด้วยการ Integrate Discrete Velocity (diff_counts) และแสดงผลแบบ Real-Time พร้อมกันได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของการอ่านค่าสัญญาณจาก Incremental Encoder ด้วย QEI และ Polling Method รวมถึงสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อทำ Homing ให้กับ Incremental Encoder ได้

สมมติฐาน

- ถ้าทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder เปลี่ยนไป สัญญาณ Output ของช่อง A และ B จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อตามทิศทางการหมุน ซึ่งสามารถใช้ในการระบุทิศทางการหมุนได้
- หากจำนวน Pulses Per Revolution ของ Incremental Encoder เพิ่มขึ้น Resolution ของการวัดตำแหน่ง เชิงมุมก็จะสูงขึ้นตาม ทำให้สามารถวัดตำแหน่งได้ละเอียดขึ้น
- ถ้าใช้ QEI Method ในการอ่านค่าสัญญาณจาก Incremental Encoder การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ของความเร็วเชิงมุมจะมีความแม่นยำและมีความหน่วงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Polling Method
- ถ้า MATLAB และ Simulink สามารถอ่านและ Log สัญญาณจาก Incremental Encoder แบบ Real-Time ได้อย่างถูกต้อง สัญญาณ Output ที่แสดงจะสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมได้ทันที
- หาก Incremental Encoder ถูกตั้งค่า Homing ถูกต้อง เมื่อตั้งค่าโปรแกรมให้ทำการ Homing Encoder จะสามารถระบุตำแหน่งเริ่มต้นที่แน่นอนและสามารถใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งในการหมุนครั้งต่อไปได้อย่างแม่นยำ

นิยามเชิงปฏิบัติการ

Nucleo-STM32	คือ Nucleo-STM32G474RE
EncoderXplorer	คือ ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Incremental Encoder, 3D-Print ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไม้เพรแทกเตอร์บอร์ดทดลอง
สายจ้มเปอร์	คือ สายไฟฟ้า หรือกลุ่มสายในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อหรือพินที่ปลายแต่ละด้าน
Noise	คือ สัญญาณไฟฟ้าในวงจรที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากสัญญาณที่ได้ออกแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า
Ground	คือ จุดอ้างอิงทางไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดัน 0V
Data Inspector	คือ Function ภายใน MATLAB ซึ่งสามารถแสดงค่าของสิ่งที่สนใจเทียบกับเวลาได้แบบ Real-Time
MATLAB	คือ แพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์
Simulink	คือ สภาพแวดล้อมแบบ Block Diagram สำหรับการออกแบบบดมเดลหลายโอดเมน
สายอัปโหลด	คือ สาย USB-A ถึง Micro-USB สำหรับส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และ Nucleo-STM32G474RE
Pin	คือ ช่องเชื่อมต่อนบ Nucleo-STM32G474RE ซึ่งสามารถทำงานได้หลาย Function
Code	คือ ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์
.m	คือ นามสกุลไฟล์ MATLAB
.slx	คือ นามสกุลไฟล์ Simulink
แรงดันขาออก	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ใด ๆ มีหน่วยเป็น โวลต์ (<i>Volt, V</i>)
องศาการหมุน	คือ องศาที่เปลี่ยนไปของแกนหมุนบน Encoder มีหน่วยเป็นองศา (θ)
Analog	คือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป มีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกัน
Digital	คือ สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอนซึ่งขนาดตั้งกล่าวจากระโดดไปまるห่วงค่าสองค่า คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิตอลนี้เป็นสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการทำงานและติดต่อสื่อสารกันเป็นค่าของเลขลงตัว โดยปกติมักแทนด้วยระดับแรงดันที่แสดงสถานะเป็น "0" และ "1"

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Incremental Encoder คืออะไร

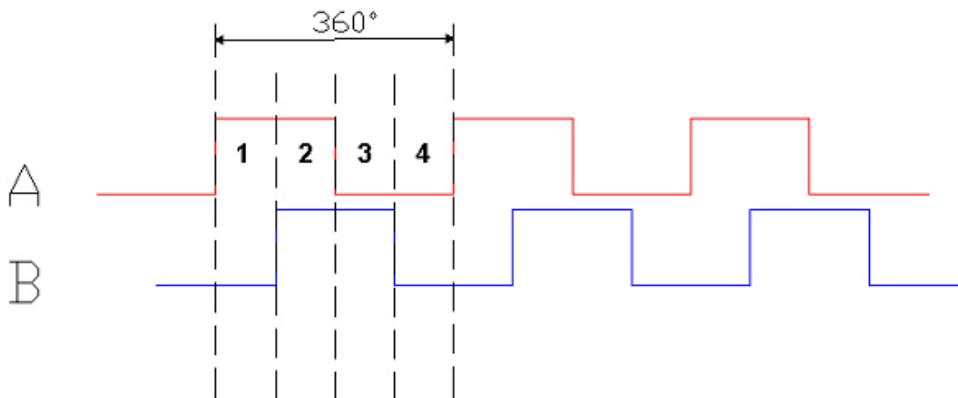


รูปที่ 1 Incremental Encoder

ที่มา: https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/incremental_encoder/

Incremental Encoder เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการแปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมหรือการวางแผนตำแหน่งของเพลาให้เป็นรหัสแบบ Digital Analog หรือ Protocol เพื่อตรวจสอบตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ เป็นหนึ่งในชนิดของ Encoder ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด โดยทั่วไปจะถูกใช้งานในการกำหนดตำแหน่งและรับข้อมูล Feedback ความเร็วของมอเตอร์

2. หลักการทำงานของ Incremental Encoder



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Incremental Encoder

ที่มา: [https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/#:~:text=Incremental%20encoders%20generate%20a%20fixed,channels%20\(A%20and%20B\).](https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/#:~:text=Incremental%20encoders%20generate%20a%20fixed,channels%20(A%20and%20B).)

Incremental Encoder จะมี Pulses Per Revolution (PPR) ซึ่งเป็นค่าคงที่เป็นตัวกำหนดความละเอียดหรือระดับความแม่นยำในการวัด Pulse จะถูกส่งออกมาในรูปแบบสัญญาณ Digital ผ่านสองช่องสัญญาณคือช่อง A และ

ซึ่ง B หากต้องการทราบแค่ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่สนใจทิศทาง จะใช้แค่ช่อง A เท่านั้น แต่หากต้องการทราบทั้งความเร็วและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป จะต้องใช้ทั้งช่อง A และ B ร่วมกัน ซึ่งทั้งสองช่องสัญญาณจะมีการเหลื่อมเฟส (Phase Shift) กันอยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Quadrature เนื่องจากในหนึ่งรอบของ Incremental Encoder จะมี 360 องศาทางไฟฟ้า เมื่อสัญญาณ A และ B อยู่ในสถานะ Quadrature และความเร็วคงที่สัญญาณ Digital ที่ส่งออกมานี้จะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมสองชุดที่มีการเหลื่อมเฟสกันอยู่ 90 องศา และเมื่อเพลากหมุนไปในทิศทางตรงข้าม ความสัมพันธ์ระหว่างช่อง A และ B จะกลับด้านกัน ในลักษณะนี้ Incremental Encoder จะสามารถบอกทิศทางการหมุนได้ ดังภาพข้างต้น

3. ประเภทของ Incremental Encoder

3.1 Optical Incremental Encoder: ใช้ LED และตัวตรวจจับแสงเพื่ออ่านรูปแบบของส่วนที่ป้องแสงและทีบแสงบนแผ่นดิสก์ที่หมุน

3.2 Magnetic Incremental Encoder: ใช้ Magnetic Sensor เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กบนแผ่นดิสก์แม่เหล็กที่หมุน

3.3 Mechanical Incremental Encoder: ใช้การสัมผัสทางกายภาพ เช่น แปรหีโรล้อสัมผัส เพื่อสร้าง Pulse เมื่อเพลากหมุน

3.4 Capacitive Incremental Encoder: ใช้ Capacitive Sensor เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าบนแผ่นดิสก์ที่หมุน

4. ตัวอย่างการใช้งานของ Incremental Encoder

4.1 การควบคุมมอเตอร์: ช่วยให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการและสามารถควบคุมความเร็วและตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

4.2 หุ่นยนต์: ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมได้

4.3 เครื่องจักรอุตสาหกรรม: ควบคุมการเคลื่อนไหวของเครื่องจักร ช่วยให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดข้อผิดพลาดในการผลิต

5. การเลือก Incremental Encoder

การเลือก Incremental Encoder ต้องพิจารณาหลายปัจจัย อาทิ ความละเอียดที่ต้องการ วัดจาก Pulses Per Revolution (PPR) ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการเข้ามต่อและการสื่อสารของ Encoder ว่าจะเป็นแบบ Digital Analog หรือ Protocol และสภาพแวดล้อมในการใช้งาน ขนาด การติดตั้ง และความเข้ากันได้กับระบบควบคุมหรืออุปกรณ์อื่น

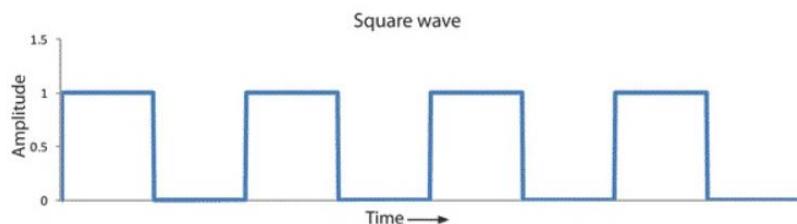
6. ข้อดีและข้อเสียของ Incremental Encoder

ข้อดี	ข้อเสีย
● โครงสร้างเรียบง่าย	● สามารถให้ข้อมูลเพียงแค่การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง
● ราคาถูก	● ต้องมีจุดอ้างอิงในการคำนวณการเคลื่อนที่
● ประยุกต์ใช้งานง่าย	
● มีมาตรฐานและแพร่หลาย	

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของ Incremental Encoder

7. คัพท์ที่เกี่ยวข้อง

7.1 สัญญาณพัลส์ (Pulse Signal)



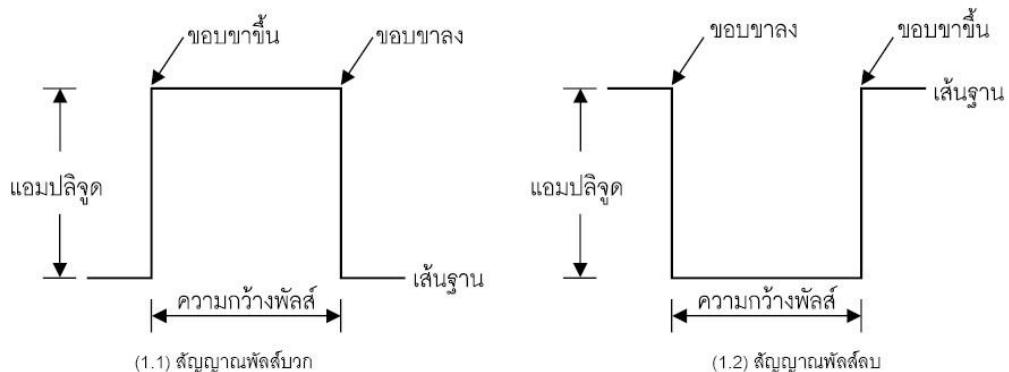
รูปที่ 3 ลักษณะสัญญาณพัลส์

ที่มา: <https://www.omi.co.th/th/article/pulse>

สัญญาณทางไฟฟ้าที่มีรูปร่างหรือลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่มีอยู่สองสภาพคือ HIGH (1) และ LOW (0) ซึ่งกันไปเรื่อยๆ สัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่อยู่รอบๆตัวเรามาย่างยาวนาน เพราะพัลส์เป็นสัญญาณที่อยู่ในอุปกรณ์ดิจิตอลทุกชนิดและยังถูกประยุกต์ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่ว่าจะเป็น การใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาในระบบคอมพิวเตอร์ ใช้ควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์หรือเป็นสัญญาณที่ใช้ในบับปริมาณบางอย่างจากการนับจำนวนของคลื่นสี่เหลี่ยม

7.2 ส่วนประกอบและประเภทของสัญญาณพัลส์ (Pulse Signal Characteristic)

1 พัลส์ประกอบไปด้วยขอบขาขึ้น ขอบขาลง และพลิจูด เส้นฐาน ความกว้างพัลส์ โดยสัญญาณพัลส์จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สัญญาณพัลส์บวก และสัญญาณพัลส์ลบ ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4 ส่วนประกอบและประเภทของสัญญาณพัลส์

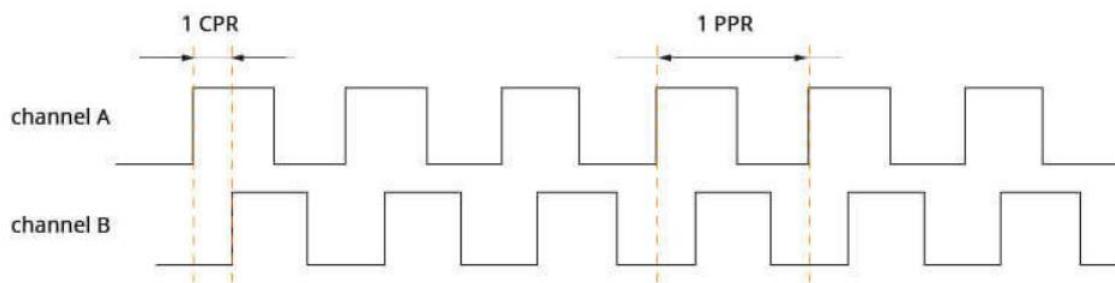
ที่มา: <https://www.inventor.in.th/home/wp-content/uploads/2018/08/basic-pulse-signal-001.jpg>

7.3 พัลส์ต่อรอบ (Pulse Per Revolution, PPR)

จำนวนพัลส์สูงสุดต่อการหมุนก้านเพลาครับ 1 รอบ Encoder โดยพัลส์เหล่านี้ใช้ในการวัดการหมุนหรือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมของเพลา ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมหรือคำนวณการเคลื่อนที่ในระบบควบคุมอัตโนมัติต่าง ๆ เช่น หุ่นยนต์ เครื่องจักร หรือระบบเซอร์โวโมเตอร์

7.4 เค้าท์ต่อรอบ (Count Per Revolution, CPR)

เค้าท์ (Count) คือ จำนวนขอบหรือการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของพัลส์ 1 พัลส์ โดยมักจะสับสนกับ PPR อยู่บ่อยครั้ง จึงสามารถอธิบายได้ด้วยภาพนี้



รูปที่ 5 CPR เปรียบเทียบกับ PPR

ที่มา: <https://www.rls.si/eng/encoder-handbook/resolution-accuracy-repeatability>

สูตรการคำนวณระหว่าง CPR และ PPR

$$CPR = PPR \times Counting\ Modes$$

ตัวอย่างเช่น

$$CPR = 1024 \times X4 (4\ Times)$$

$$CPR = 4096$$

7.5 รูปแบบการนับ (Counting Modes)

รูปแบบการนับมีอยู่ทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ X1 X2 และ X4 มีวิธีการนับ และระดับความละเอียดดังตารางนี้

	วิธีการนับ	ระดับความละเอียด
X1	นับเฉพาะขอบขาขึ้นของพัลส์ใน Channel เดียว	ต่ำ
X2	นับขอบขาขึ้น และขาลงของพัลส์ใน Channel เดียว	ปานกลาง
X4	นับขอบขาขึ้น และขาลงของพัลส์ทั้งสอง Channel	สูง

7.6 Quadrature Resolution

ความละเอียดของ Encoder เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกซื้อ Encoder เนื่องจากมีผลต่อค่าที่จะออกมา

quadrature resolutions ¹	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048	PPR
-------------------------------------	--	-----

รูปที่ 6 Quadrature Resolutions ของ Incremental Encoder AMT103-V

7.7 การนับการเปลี่ยนแปลง (Differential Count)

Diff Count หรือ Differential Count ในบริบทของ Encoder หมายถึง การนับหรือบันทึกจำนวนสิ่งที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างสองตำแหน่งหรือระหว่างสองช่วงเวลา เพื่อช่วยในการวัดการหมุนหรือการเคลื่อนไหวของวัตถุ โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

สูตรการคำนวณ

$$\text{Differential Count} = \text{Current Value} - \text{Previous Value}$$

7.8 พัลส์สัมพัทธ์ (Relative Pulse)

จำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นในระยะทางหรือมุมที่วัดจากตำแหน่งเริ่มต้นหรือจุดอ้างอิงหนึ่งไปยังตำแหน่งใหม่ โดยนับเฉพาะพัลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งปัจจุบันเท่านั้น

สูตรการคำนวณ

$$\text{Relative Pulse} = \text{Current Pulse} - \text{Previous Pulse}$$

7.9 ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative Position)

ตำแหน่งของวัตถุหนึ่งที่ถูกอธิบายโดยอิงจากตำแหน่งของวัตถุอีกวัตถุหนึ่งหรือจุดอ้างอิง ในการทำการทดลองนี้หมายถึงตำแหน่งของตัวนับ (Encoder) ที่คำนวณจากค่าเริ่มต้นหรือ "ศูนย์" ใหม่ที่ถูกกำหนดโดยการรีเซ็ตผ่านปุ่มกด ทำให้ค่าที่ได้มีทั้งบวกและลบโดยไม่มีขอบเขตจำกัด ซึ่งมีประโยชน์เมื่อต้องการนับตำแหน่งต่อเนื่องไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากจุดเริ่มต้น

สูตรการคำนวณในหน่วยองศา

$$\text{Relative Position (degree)} = \frac{\text{Pulse Counted}}{\text{PPR}} \times 360^\circ$$

ในหน่วยเรเดียน

$$\text{Relative Position (radians)} = \frac{\text{Pulse Counted}}{\text{PPR}} \times 2\pi$$

7.10 ตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position)

มุมที่วัดได้ของวัตถุในขณะที่วัตถุนั้นมุนรอบแกนหมุนหรือจุดหมุน โดยทั่วไปจะวัดเป็นองศา ($^{\circ}$) หรือ เรเดียน (rad) ตำแหน่งเชิงมุมใช้ในการบอกตำแหน่งของวัตถุที่กำลังหมุนว่าหมุนไปถึงมุมเท่าใดแล้วเมื่อเทียบกับ จุดเริ่มต้นหรือแนวอ้างอิง ในการทดลองนี้ Angular Position คือ ตำแหน่งของเพลาที่หมุนไปในแต่ละมุม โดยวัด จากจุดเริ่มต้นหรือจุดอ้างอิงที่กำหนดไว้ กล่าวคือ Angular Position คือสิ่งเดียวกันกับ Relative Position

สูตรการคำนวณในหน่วยองศา

$$\text{Angular Position (degree)} = \frac{\text{Pulse Counted}}{\text{PPR}} \times 360^{\circ}$$

ในหน่วยเรเดียน

$$\text{Angular Position (radians)} = \frac{\text{Pulse Counted}}{\text{PPR}} \times 2\pi$$

7.11 ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเชิงมุมต่อหน่วยเวลา คือ ความเร็วที่วัตถุหมุนรอบแกนหมุนหรือจุดหมุน โดยวัดเป็นหน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/s) หรือ องศาต่อวินาที ($^{\circ}/\text{s}$) ในการทดลองนี้ Angular Velocity คือ อัตรา ที่เพลาหมุนเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมต่อ 1 หน่วยเวลา

สูตรการคำนวณ

$$\text{Angular Velocity} (\omega, \text{degree/second}) = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

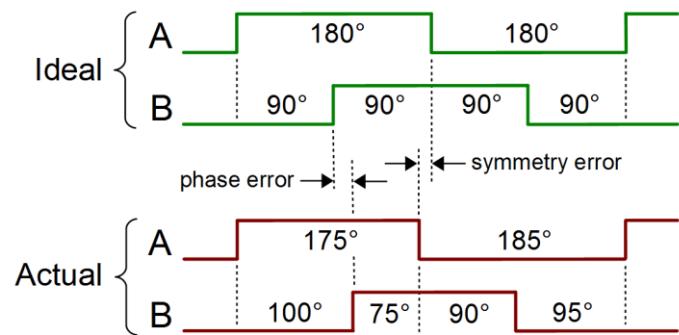
หรือ

$$\text{Angular Velocity} = \frac{\text{Current Position} - \text{Previous Position}}{\text{Current Time} - \text{Previous Time}}$$

แปลงให้อยู่ในรูปของพัลส์

$$\text{Angular Velocity} = \frac{\text{Pulse Counted}}{\Delta t} \times \frac{2\pi}{\text{PPR}}$$

7.12 การเลื่อนเฟส (Phase Shift)



รูปที่ 7 Incremental encoders exhibit symmetry and phase errors due to sensor imperfections

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder

ตามอุดมคติ Encoder ควรจะต้องมี Phase Shift ที่ 90 องศาเสมอ แต่ในความเป็นจริงการเกิด Phase Shift ที่ 90 องศาอาจไม่เกิดขึ้นเสมอไป เนื่องจากปัญหาความไม่สมบูรณ์แบบของเซ็นเซอร์และการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ทำให้ Phase Shift อาจมีการคาดเคลื่อนได้ ซึ่งต่อมาซึ่งความกว้างของ Pulse และ Phase Shift จะถูกกำหนดโดย Symmetry Error และ Phase Error ซึ่งจะอยู่ใน datasheet ของ Incremental Encoder

8. Datasheet และข้อมูลโดยคร่าวของ Potentiometer ที่ใช้ในการทดลอง

8.1 Incremental Encoder AMT103-V

SERIES: AMT10 | **DESCRIPTION:** MODULAR INCREMENTAL ENCODER

FEATURES

- patented capacitive ASIC technology
- low power consumption
- CMOS outputs
- 16 DIP switch selectable resolutions
- index pulse
- modular package design
- straight [radial] and right-angle [axial] versions
- 9 mounting hole options for radial version
- 8 mounting hole options for axial version
- 40-100°C operating temperature



ELECTRICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
power supply	VDD	3.6	5	5.5	V
current consumption	with unloaded output		6		mA
output high level		VDD-0.8			V
output low level			0.4		V
output current	CMOS sink/source per channel		2		mA
rise/fall time			30		ns

INCREMENTAL CHARACTERISTICS

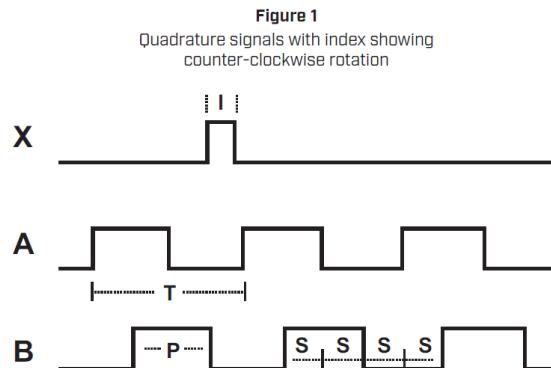
parameter	conditions/description	min	typ	max	units
channels	quadrature A, B, and X index				
waveform	CMOS voltage square wave				
phase difference	A leads B for CCW rotation (viewed from front)		90		degrees
quadrature resolutions ¹	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048				PPR
index ²	one pulse per 360 degree rotation				
accuracy			0.25		degrees
quadrature duty cycle [at each resolution]	256, 512, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 384, 400, 500 800, 1000	49 47 43	50 50 50	51 53 56	%

Notes:
1. Resolution selected via adjustable DIP switch, pre-set to 2048 PPR. All resolutions are listed as pre-quadrature, meaning the final number of counts is PPR x 4.
2. Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly (non-magnetic version available with 8 pulses per revolution).

MECHANICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
motor shaft length		9			mm
motor shaft tolerance				NOM +0/-0.015	mm
weight	AMT102 AMT103			20.5 14.0	g g
axial play				±0.3	mm
rotational speed [at each resolution]	192, 384, 400, 500, 800, 1000, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 200, 250, 256, 512			7500 15000	RPM

WAVEFORMS



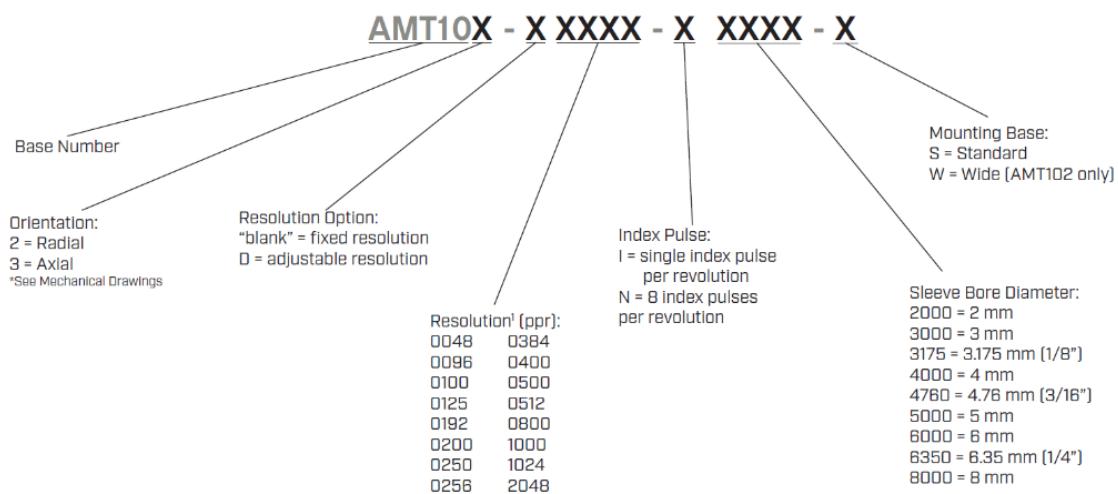
The following parameters are defined by the resolution selected for each encoder. The encoders resolution is listed as Pulses Per Revolution (PPR), which is the number of periods (or high pulses) over the encoders revolution.

Parameter	Description	Expression	Units	Notes
PPR	resolution		Pulses Per Revolution	This is the user selected value and the format all resolutions are listed in
CPR	counts	PPR x 4	Counts Per Revolution	This is the number of quadrature counts the encoder has
T	period	360/R	mechanical degrees	
P	pulse width	T/2	mechanical degrees	
S	A/B state width	T/4	mechanical degrees	This is the width of a quadrature state
I	index width	T/4	mechanical degrees	The width of a once per turn index is the state width for A & B lines

Note: For more information regarding PPR, CPR, or LPR (Lines Per Revolution) view <https://www.sameskydevices.com/blog/what-is-encoder-ppr-cpr-and-lpr>

PART NUMBER KEY

For customers that prefer a specific AMT10 configuration, please reference the custom configuration key below.



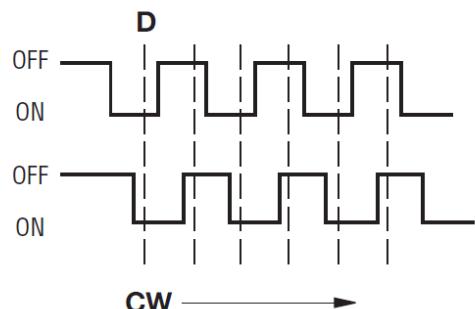
Note: 1. Fixed resolutions are permanently set at this value; adjustable resolutions are preset via DIP switch to this value upon shipment.

**BOURNS®****Features**

- Push switch option
- Compact, rugged design
- High reliability
- Metal bushing/shaft
- RoHS compliant*

PEC11R Series - 12 mm Incremental Encoder**Electrical Characteristics**

Output.....	2-bit quadrature code
Contact Rating.....	10 mA @ 5 VDC
Insulation Resistance	100 megohms @ 250V DC
Dielectric Withstanding Voltage	
Sea Level.....	300 VAC min.
Electrical Travel	Continuous
Contact Bounce (15 RPM).....	2.0 ms max.**
RPM (Operating)	60 max.**

Quadrature Output Table**How To Order****PEC11R 4 0 20 F - S 0012**

Model _____

Terminal Configuration _____

- 1 = PC Pin Vertical / Side Facing 7 mm 4 = PC Pin Horizontal / Rear Facing
 2 = PC Pin Vertical / Side Facing 10 mm

Detent Option _____

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 0 = No Detents (12, 18, 24 pulses) | 2 = 24 Detents (12, 24 pulses) |
| 1 = 18 Detents (18 pulses) | 3 = 12 Detents (12, 24 pulses) |

Standard Shaft Length _____

- | | |
|--------------|--------------|
| 15 = 15.0 mm | 25 = 25.0 mm |
| 20 = 20.0 mm | 30 = 30.0 mm |

Shaft Style _____

- F = Metal Flatted Shaft K = Metal Knurled Shaft¹

Switch Configuration _____

- S = Push Momentary Switch N = No Switch

Resolution _____

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

¹Metal knurled shaft without switch is available in 15, 20 and 30 mm shaft lengths.
 Metal knurled shaft with push momentary switch is available in 15 and 20 mm shaft lengths.

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	Incremental Encoder AMT103-V	1	อัน
2	PEC11R-4220F-N0024	1	อัน
3	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
4	บอร์ดทดลอง EncoderXplorer	1	บอร์ด
5	สายอัปโหลด	1	เส้น
6	สายจัมเบอร์ฟู้น เมีย ความยาว 20 เซนติเมตร	10	เส้น
7	AC/DC Adapter 100-240VAC to 9VDC 2A	1	ชุด

ตารางที่ 2 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Incremental Encoder
- วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ผู้จัดทำจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้
 - การทดลองที่ 1 เพื่อดูลักษณะรูปแบบสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงรูปแบบเฟสของสัญญาณ และหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder
 - การทดลองที่ 2 เพื่ออ่านค่า Raw Signal จาก Incremental Encoder ในรูปแบบสัญญาณ Quadrature Encoder ทุกรูปแบบและทุกวิธีการและแปลงเป็น Relative Position ด้วยการ Integrate Discrete Velocity การ Homing Incremental Encoder และความแตกต่างของ Relative Pulse และ QEI
 - การทดลองที่ 3 เพื่อดูว่าสัญญาณ Output ปรับนัดตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity
- ทำการทดลองที่ 1 เพื่อดูลักษณะสัญญาณ Output และหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution
- ทำการทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาสัญญาณ Quadrature Encoder ทุกรูปแบบและทุกวิธีการ
- ทำการทดลองที่ 3 เพื่อดูการปรับนัดระหว่างสัญญาณ Output และ Input แบบ Real Time
- สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

การทดลองเพื่อดูลักษณะรูปแบบสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงรูปแบบเฟสของสัญญาณ และหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ระยะทางหรือองศาการหมุนของ Encoder

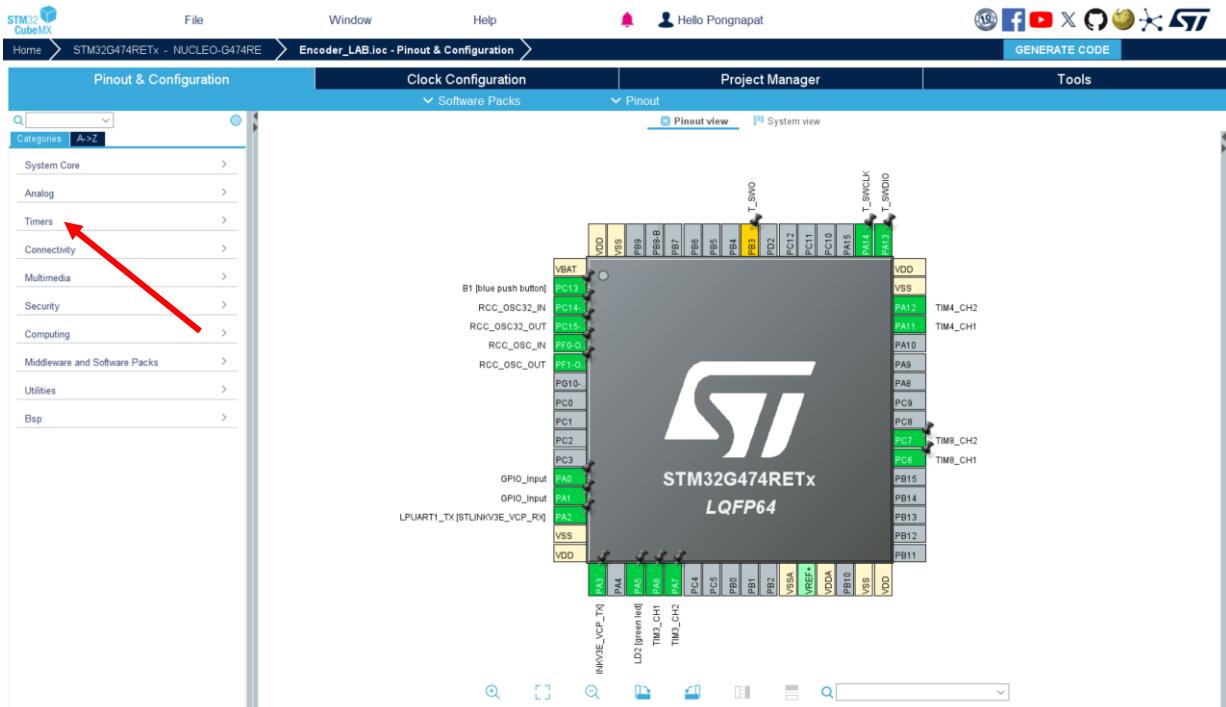
ตัวแปรตาม: จำนวน Pulse

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, Pulses Per Revolution

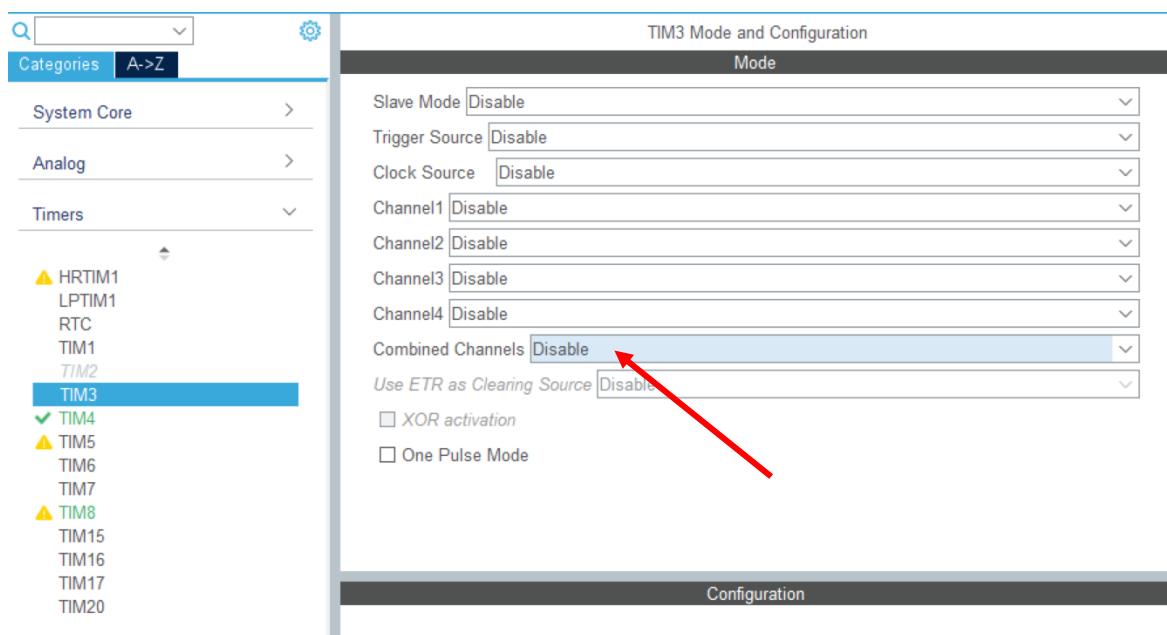
วิธีดำเนินการทดลอง

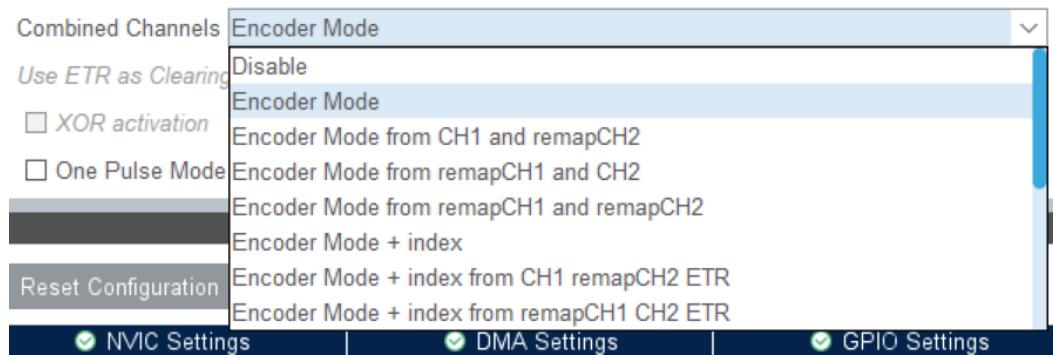
1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน EncoderXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Ground ของ Nucleo-STM32 เข้าที่ขา Ground ของ Encoder ที่สนใจ
3. เสียบสายจ้มเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของ Nucleo-STM32 เข้าที่ขา + ของ Encoder ที่สนใจ
4. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin D12 ของ Nucleo-STM32 เข้าขา A ของ Encoder ที่สนใจ
5. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin D11 ของ Nucleo-STM32 เข้าขา B ของ Encoder ที่สนใจ
6. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin D12 ไปเข้า Pin PA12, PC7, A1
7. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin D11 ไปเข้า Pin PA11, PC6, A0
8. หมุน Encoder เพื่อศึกษาค่าที่ได้รับ
9. สรุป Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder บนบอร์ดทดลอง

รีบมต้น การจะใช้งาน QEI บน Nucleo-STM32 ได้นั้น จะเป็นจะต้องใช้การ Interrupt ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำงานควบคู่กับ Pin TIMER ใน Nucleo-STM32 จึงจำเป็นต้องตั้งค่า Pin ต่าง ๆ ก่อนการเริ่มทดลองทั้งหมด ซึ่งการทดลองจะอ่านค่าทั้งหมด 4 รูปแบบได้แก่ โดยแบ่งเป็น Interrupt 3 แบบ ได้แก่ X1, X2, X4 และ Digital 1 แบบ ซึ่งคือ Polling Method การตั้งค่า Pin ต่าง ๆ ภายใน Nucleo-STM32 สามารถทำได้ผ่านซอฟต์แวร์ STM32CubeMX

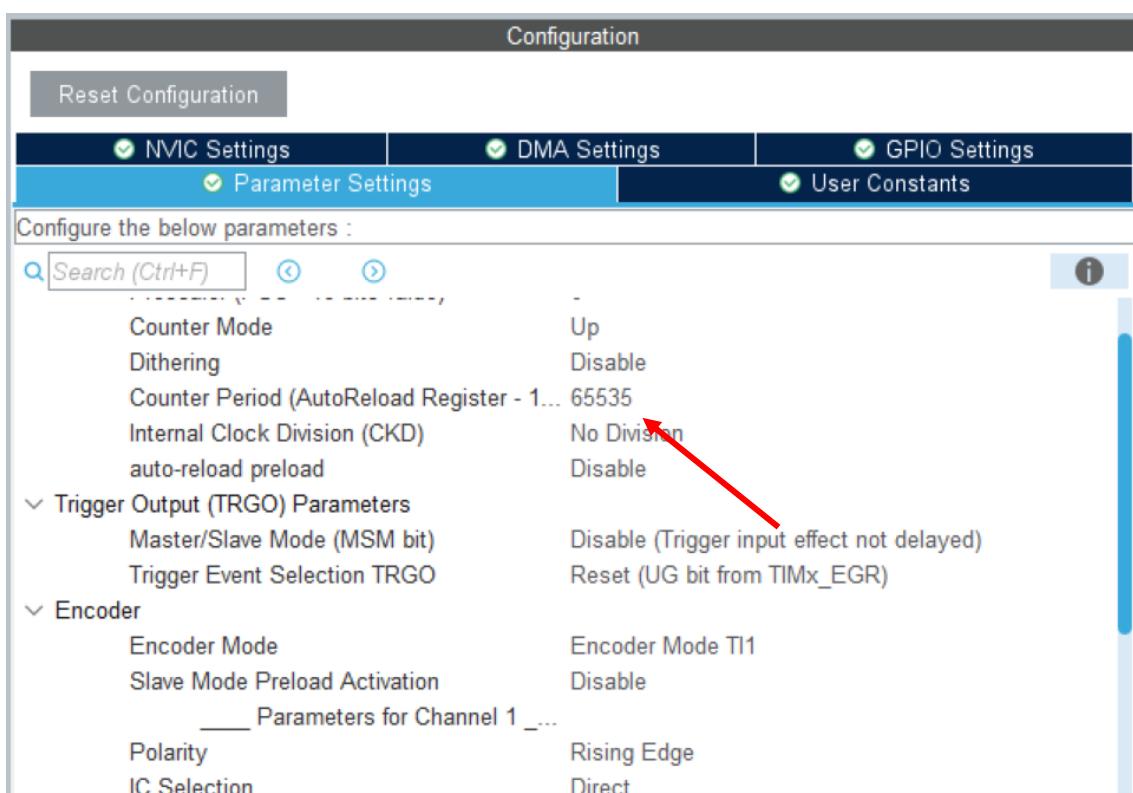


เมื่อเปิด Project ใหม่ที่เขียนต่อ กับ Simulink เรียบร้อยแล้ว ก็จะสามารถตั้งค่า Pin ตามความต้องการของเราได้โดยในการทดลองนี้จะตั้ง Pin TIMER ก่อน ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ TIMER 3, TIMER 4 และ TIMER 8





จากนั้นกดไปที่ Dropdown Combined Channels เพื่อเลือกโหมดการทำงานของ Pin TIMER ในที่นี่เลือกเป็น Encoder Mode



แบบ Configuration จะขึ้นมา ให้เลือกแบบ Parameter Settings และเริ่มปรับจากเลข Counter Period ซึ่งคือ เลขขอบบนสุดที่ Pulse จะไปถึงได้ ก่อนจะวนกลับมาที่ศูนย์และเริ่มต้นการนับใหม่ จึงต้องเปลี่ยนให้เลขนี้สามารถหารด้วย Pulses Per Revolution ของ Encoder แต่ละตัวให้ลงตัว เพื่อให้การคำนวณต่าง ๆ ในภายหลังมีความสะดวกไม่ยุ่งยาก โดยในที่นี่จะตั้งไว้ที่ 65520 เนื่องจากใช้ PEC11R-4220F-N0024 ซึ่งมี 24 PPR เป็นหลักในการทดลอง แต่ถ้าจะใช้กับ AMT103-V จะต้องตั้งไว้ที่ 63488

Configuration

Reset Configuration

NVIC Settings DMA Settings GPIO Settings
 Parameter Settings User Constants

Configure the below parameters :

Search (Ctrl+F)

Counter Mode	Up
Dithering	Disable
Counter Period (AutoReload Register - 1...)	65535
Internal Clock Division (CKD)	No Division
auto-reload preload	Disable
Trigger Output (TRGO) Parameters	
Master/Slave Mode (MSM bit)	Disable (Trigger input effect not delayed)
Trigger Event Selection TRGO	Reset (UG bit from TIMx_EGR)
Encoder	
Encoder Mode	Encoder Mode TI1
Slave Mode Preload Activation	Disable
Parameters for Channel 1 ...	
Polarity	Rising Edge
IC Selection	Direct

ตามด้วยการเลือกรูปแบบการอ่านค่าของ Encoder ซึ่งตั้งเป็น Encoder Mode x1_TI1 สำหรับการอ่านแบบ X1 ใน Pin TIMER 3, Encoder Mode TI1 สำหรับการอ่านแบบ X2 ใน Pin TIMER 4, Encoder Mode TI1 and TI2 สำหรับการอ่านแบบ X4 ใน Pin TIMER 8

Encoder

Encoder Mode

Slave Mode Preload Activation

Parameters for Channel 1 ...

Polarity

IC Selection

Encoder Mode TI1

Encoder Mode TI2

Encoder Mode TI1 and TI2

Encoder Mode Clock plus direction, x2

Encoder Mode Clock plus direction, x1

Encoder Mode Directional Clock, x2

Encoder Mode Directional Clock, x1

Encoder Mode x1_TI1

เมื่อเสร็จแล้วให้กดคุณลักษณะ GPIO Settings เพื่อดู Pin ที่ซื้อฟ็อร์แวร์กำหนดให้ ในจุดนี้สามารถย้ายที่ Pin ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยอ้างอิงจากชื่อฟ์ฟ์แวร์

Configuration

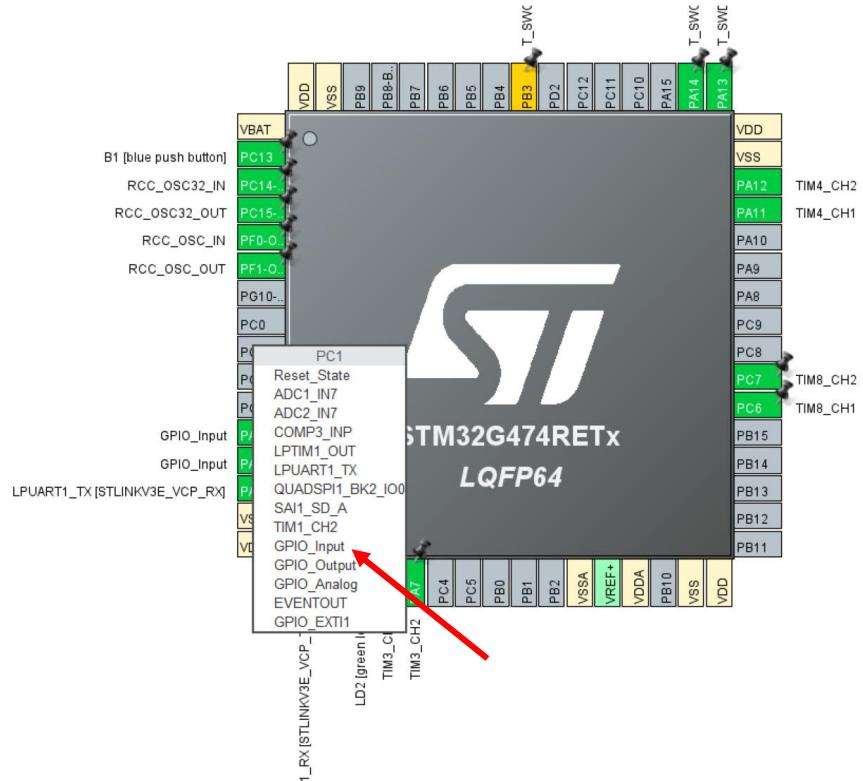
NVIC Settings DMA Settings GPIO Settings
 Parameter Settings User Constants

Search Signals

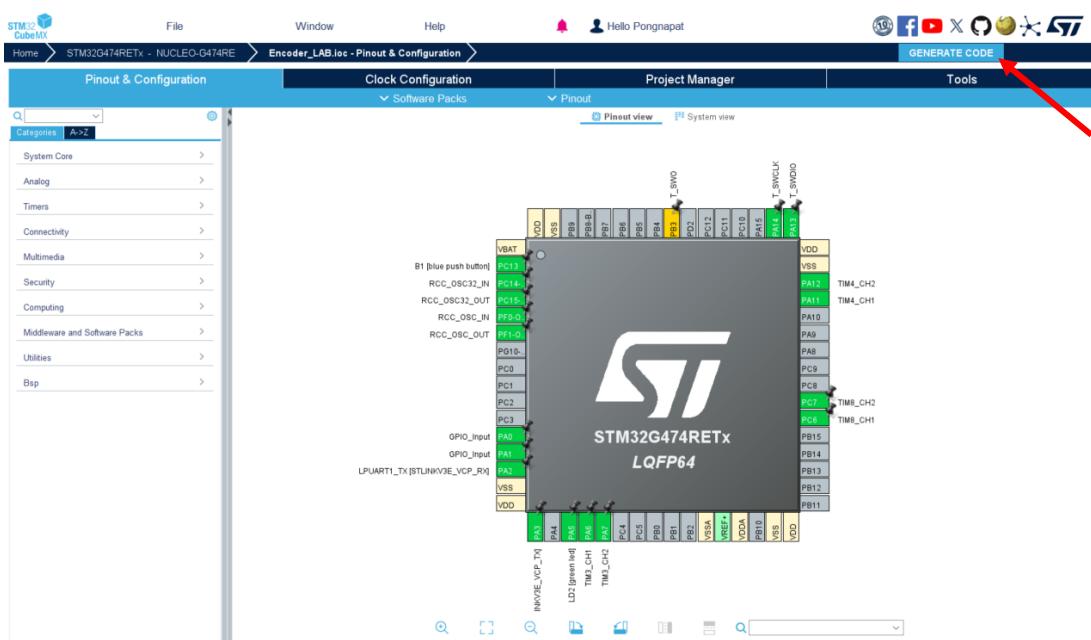
Show only M

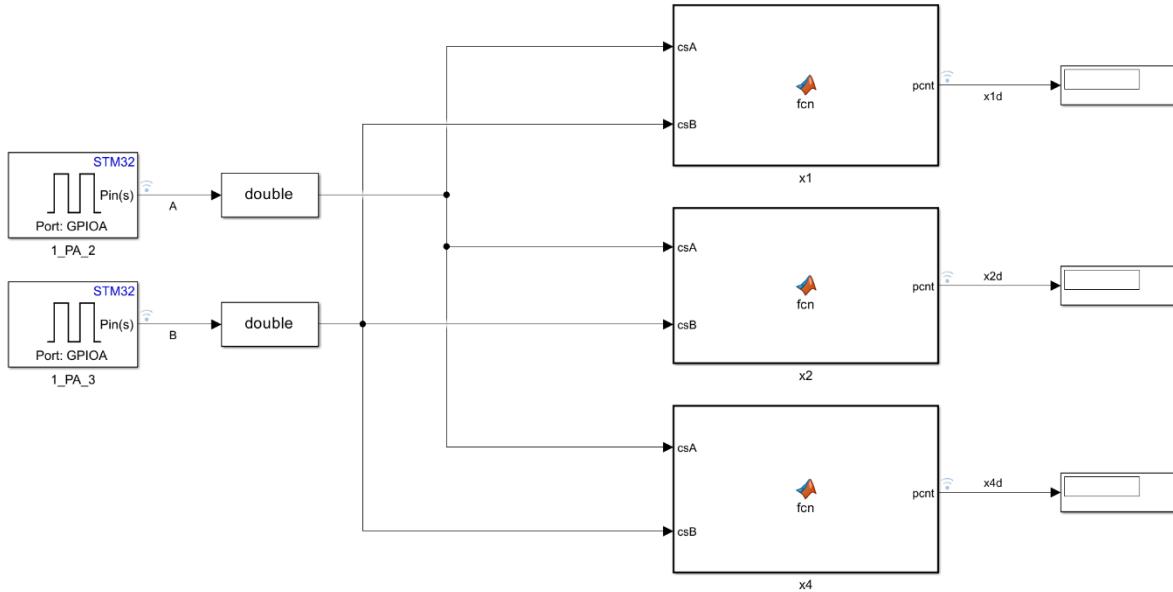
Pin Na...	Signal on ...	GPIO outp...	GPIO mode	GPIO Pull...	Maximum ...	Fast Mode	User Label
PA6	TIM3_CH1	n/a	Alternate ...	No pull-up ...	Low	n/a	
PA7	TIM3_CH2	n/a	Alternate ...	No pull-up ...	Low	n/a	

กลับมาที่หน้าหลัก จะต้อง Assign Pin GPIO Input เพื่ออ่านค่า Digital มาทำ Polling Method สามารถกด และเลือกได้เลย



แล้วจังกัด Generate Code เพื่อให้ไฟล์ IOC เชื่อมต่อจะใช้งานร่วมกับ Simulink ได้ โดยถ้ามี Error ที่จะต้องปรับแก้ Settings ต่าง ๆ ก็สามารถทำตามคำแนะนำของซอฟต์แวร์ได้เลย





รูปที่ 8 Encoder_polling.slx

Encoder_polling.slx ทำหน้าที่อ่านสัญญาณ Digital จาก Channel A และ B ของ Encoder เพื่อนำไปเทียบขอบข่ายของสัญญาณและนับ Pulse แบบ X1, X2 และ X4 ด้วยวิธี Polling Method

```

function pcnt = fcn(csA, csB)
    persistent psA pcnt_int;

    if isempty(psA)
        psA = 0;
        pcnt_int = 0;
    end

    % Detect rising edge on csA
    if psA == 0 && csA == 1
        % Update pulse count based on direction (csB)
        if csB == 0 % Clockwise direction
            pcnt_int = pcnt_int + 1;
        elseif csB == 1 % Counterclockwise direction
            pcnt_int = pcnt_int - 1;
        end
    end

    pcnt = pcnt_int;
    psA = csA;
end

```

Code ที่ 1 X1_Polling Function

```

function pcnt = fcn(csA, csB)
persistent psA pcnt_int;

if isempty(psA)
    psA = 0;
    pcnt_int = 0;
end

% Detect rising edge on csA
if psA ~= csA
    if csA == 1
        if csB == 0
            pcnt_int = pcnt_int + 1;
        else
            pcnt_int = pcnt_int - 1;
        end
    elseif csA == 0
        if csB == 1
            pcnt_int = pcnt_int + 1;
        else
            pcnt_int = pcnt_int - 1;
        end
    end
end
pcnt = pcnt_int;
psA = csA;
end

```

Code # 2 X2_Polling Function

```

function pcnt = fcn(csA, csB)
persistent psA psB pcnt_int;

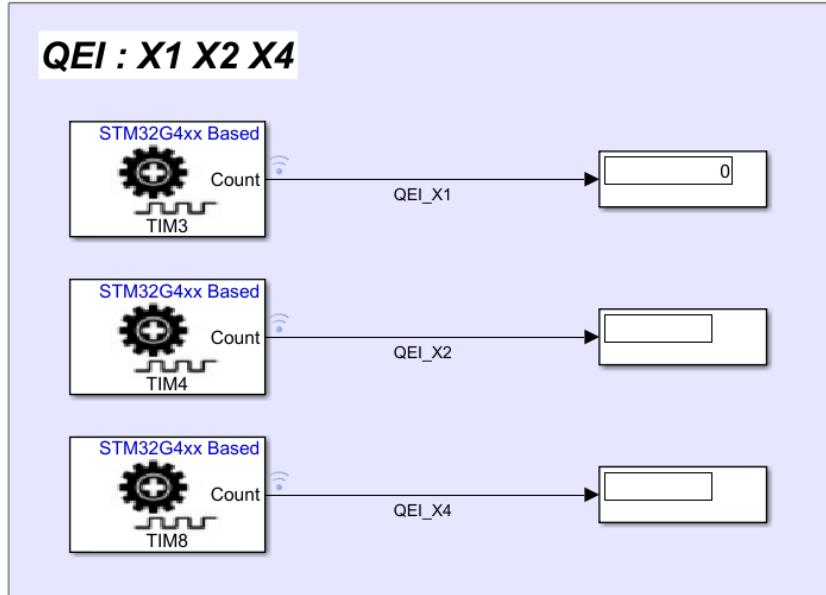
if isempty(psA)
    psA = 0;
    psB = 0;
    pcnt_int = 0;
end

% Detect rising edge on csA
if psA ~= csA || psB ~= csB
    if psA ~= csA || psB ~= csB
        if (psA == 0 && csA == 1 && csB == 0) || ... % Rising A, B = 0
            (psB == 0 && csB == 1 && csA == 1) || ... % Rising B, A = 1
            (psA == 1 && csA == 0 && csB == 1) || ... % Falling A, B = 1
            (psB == 1 && csB == 0 && csA == 0)           % Falling B, A = 0
            pcnt_int = pcnt_int + 1;
        else
            pcnt_int = pcnt_int - 1;
        end
    end
end
pcnt = pcnt_int;
psA = csA;
psB = csB;
end

```

Code # 3 X4_Polling Function

Code ข้างต้นทั้ง 3 เป็น Function สำหรับ Polling Method ซึ่งส่ง Output จากอุปกรณ์เป็นจำนวน Pulse ที่นับได้ และสามารถนำ Pulse นี้ไปคำนวณต่อได้



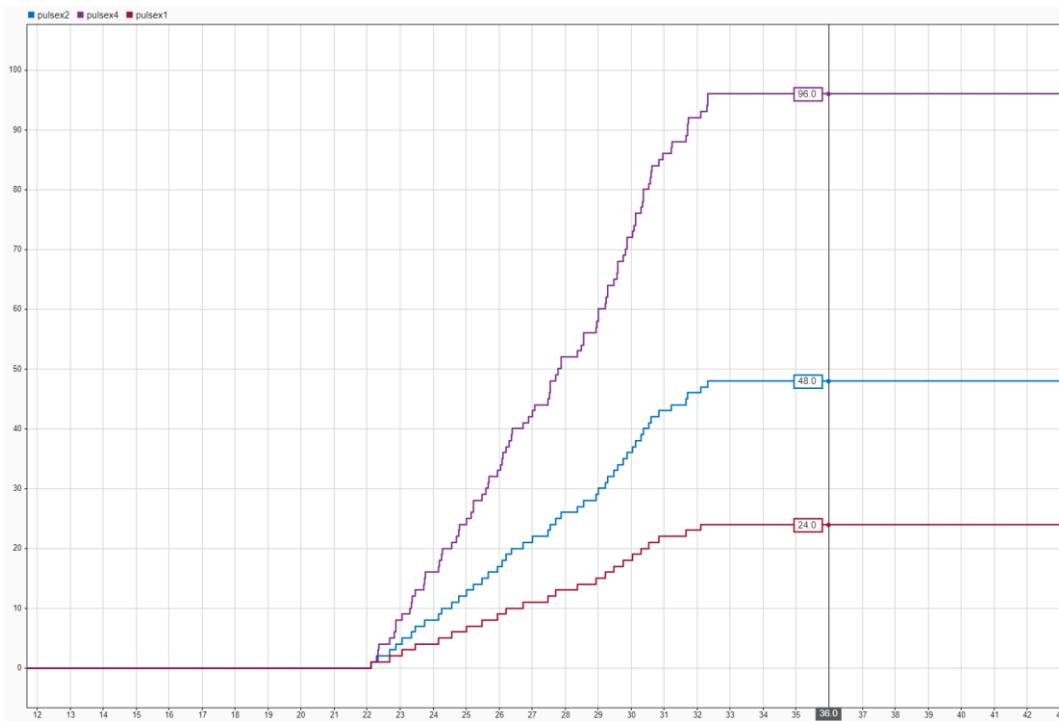
รูปที่ 9 Encoder_Sim3.slx

Block Encoder จาก Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics STM32 Processor สามารถดึงค่า Quadrature Output หรือค่า QEI ออกมาได้จาก Pin บนบอร์ด STM32G474RE ที่ผู้จัดทำใช้จากนั้นทำการต่อ Encoder Block เข้ากับ Display เพื่อทำการ Log สัญญาณ โดย QEI จะให้ Output ออกมาเป็นค่า 16-bit โดยจะไม่สามารถเกินค่า Counter Period ที่ถูกตั้งเอาไว้ได้

ผลการทดลองที่ 1

1. การใช้ Data Inspector ในการนับค่า Pulse Per Revolution ของ PEC11R-4220F-N0024

1.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 10 กราฟ Pulse Per Revolution จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วยวิธีการ QEI

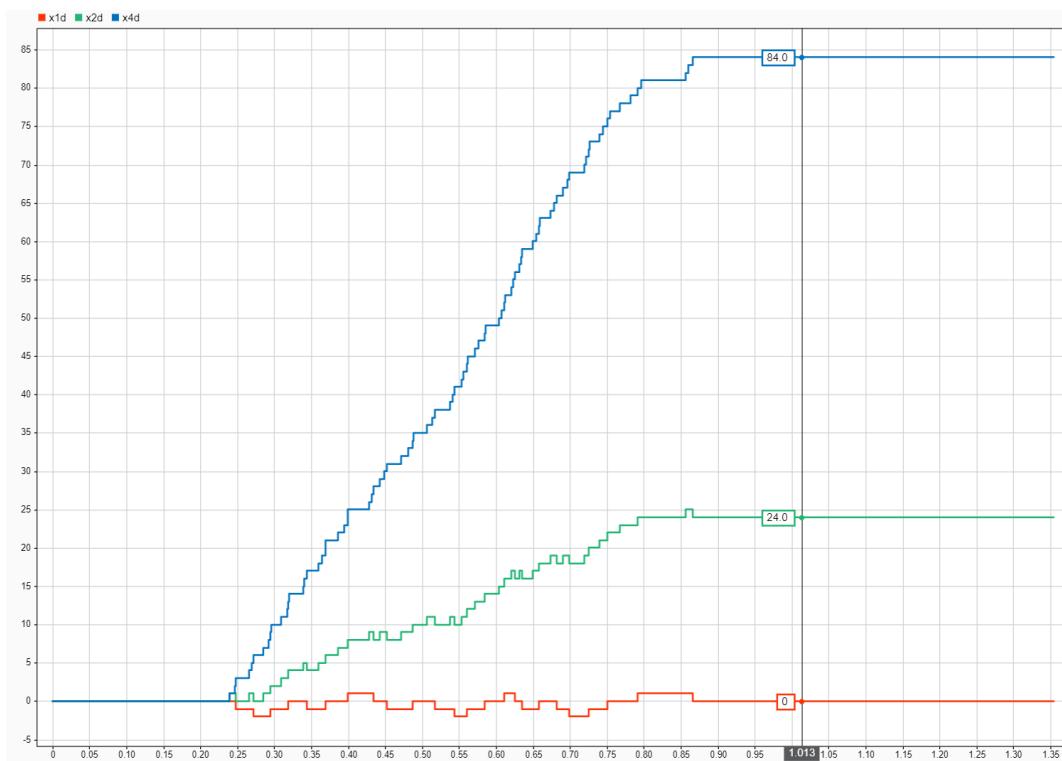
แสดงการนับ Pulse Per Revolution ด้วย QEI โดยมีการแสดงจำนวน Pulse จากการหมุน 5 รอบของแต่ละรูปแบบการนับได้แก่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง PEC11R-4220F-N0024 มีจำนวน Pulse ดังตารางนี้

ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการนับด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	24	48	72	96	120
X2	48	96	144	192	240
X4	96	192	288	384	480

จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความแม่นยำมาก เมื่อจากการใช้ QEI โดย X1 X2 และ X4 มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน กล่าวคือ X2 ต้องมีความสัมพันธ์เป็น 2 เท่าของ X1 และ X4 ต้องมีความสัมพันธ์เป็น 2 เท่าของ X2

1.2 Polling Method



รูปที่ 11 กราฟ Pulse Per Revolution จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วย Polling Method

แสดงการนับ Pulse Per Revolution ด้วย Polling Method การหมุน 5 รอบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ QEI แล้ว จำนวน Pulse แสดงไม่ถูกต้อง ในทุกรูปแบบการนับตั้งแต่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง PEC11R-4220F-N0024 มีจำนวน Pulse ดังตารางนี้

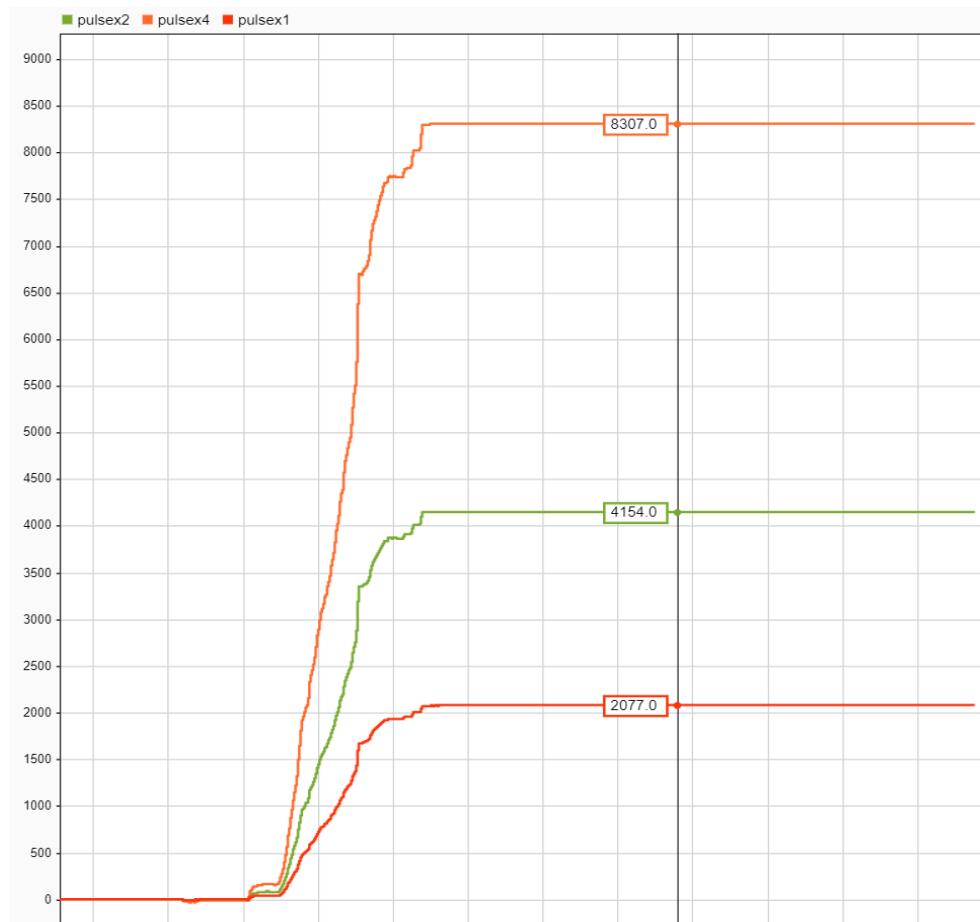
ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการนับด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	-21	-39	-56	-72	-93
X2	-10	-10	-6	-4	-10
X4	61	126	193	262	325

จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงไม่สามารถบ่งบอกถึงจำนวน Pulse ที่คงที่ได้ เนื่องจากการใช้ Polling Method โดย X1 X2 และ X4 ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน

2. การใช้ Data Inspector ในการนับค่า Pulse Per Revolution ของ AMT103-V

2.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 12 กราฟ Pulse Per Revolution จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วยวิธีการ QEI

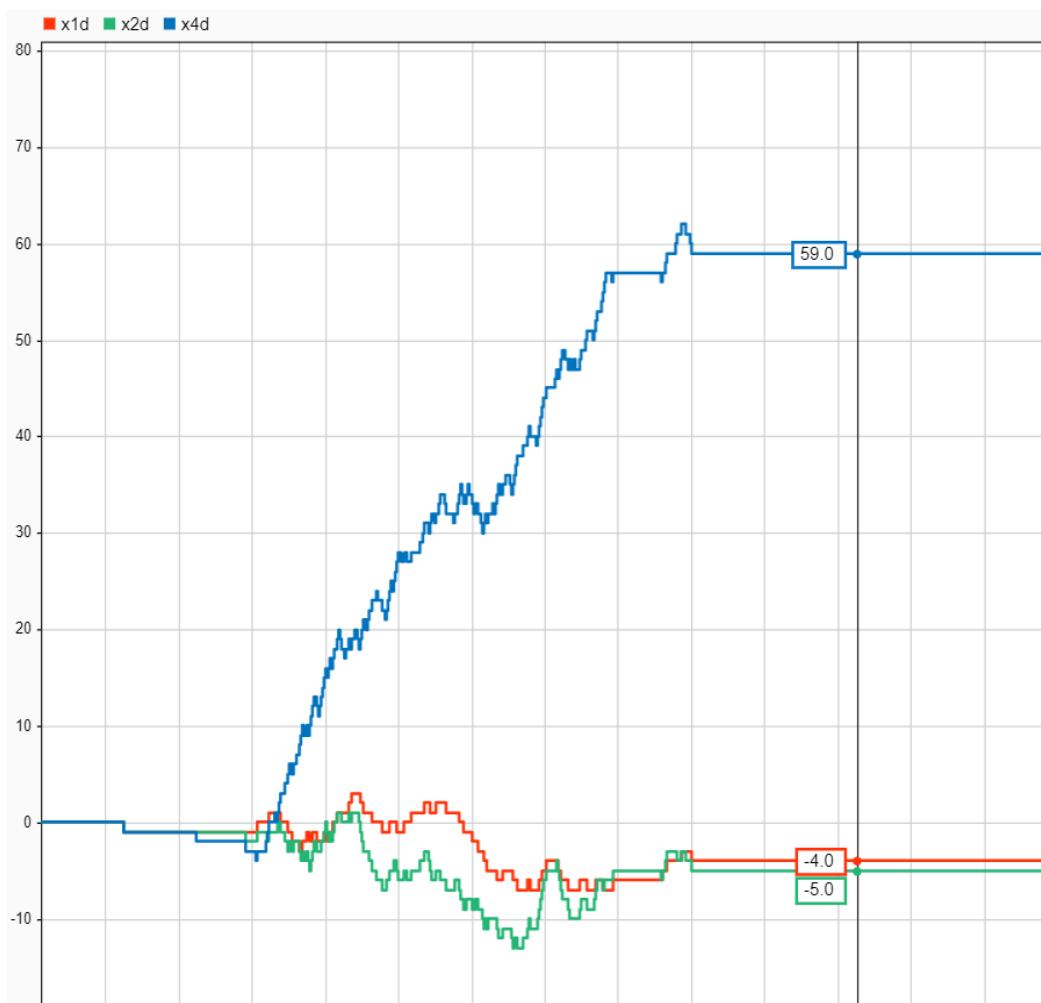
แสดงการนับ Pulse Per Revolution ด้วย QEI โดยมีการแสดงจำนวน Pulse จากการหมุน 5 รอบของแต่ละรูปแบบการนับได้แก่ X1 X2 และ X4 AMT103-V มีจำนวน Pulse ดังตารางนี้

ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการนับด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	2077	4158	6235	8310	10425
X2	4154	8395	12465	16645	20850
X4	8307	16614	25020	33228	41750

จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความถูกต้อง อาจมีความคาดเคลื่อนจากการใช้มือในการหมุน ซึ่งให้องศาที่ต้องการไม่แม่นยำนัก อย่างไรก็ตามค่าที่อ่านมาไม่ได้แสดงถึงความไม่สมพันธ์หรือความผิดปกติแต่อย่างใด กล่าวคือ ค่าไม่มีหลักทศนิยม หรือค่าหารลงตัว

2.2 Polling Method



รูปที่ 13 กราฟ Pulse Per Revolution จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วยวิธีการ QEI

แสดงการนับ Pulse Per Revolution ด้วย QEI โดยมีการแสดงจำนวน Pulse จากการหมุน 5 รอบของแต่ละรูปแบบการนับได้แก่ X1 X2 และ X4 AMT103-V มีจำนวน Pulse ดังตารางนี้

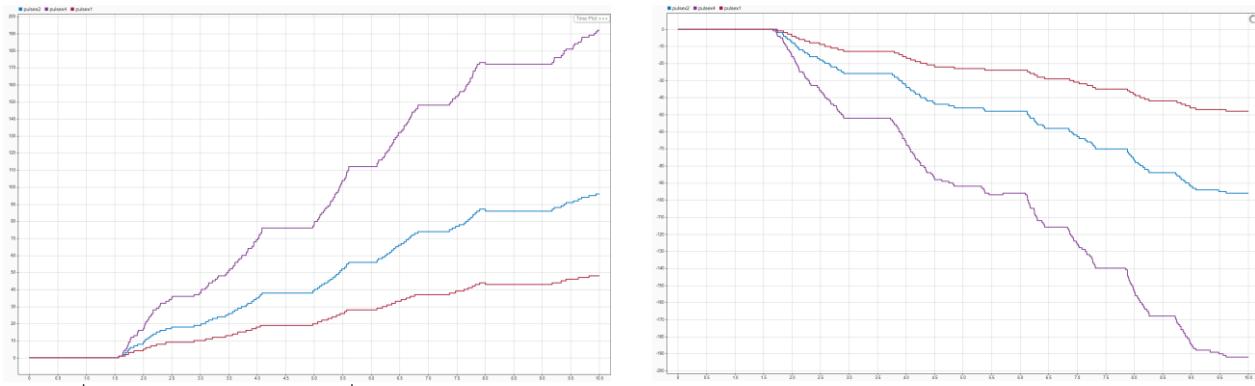
ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการนับด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	-5	-10	-14	-15	-23
X2	-4	-7	-14	-12	-25
X4	59	120	243	420	763

จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงไม่มีความแม่นยำ เนื่องจากการใช้ Polling Method ใช้การส่ง Sample Time จากการปรับค่า Fixed Step ทำให้ค่าเกิดความคาดเคลื่อน

3. การใช้ Data Inspector ในการดูทิศทางของ Pulse ของ PEC11R-4220F-N0024

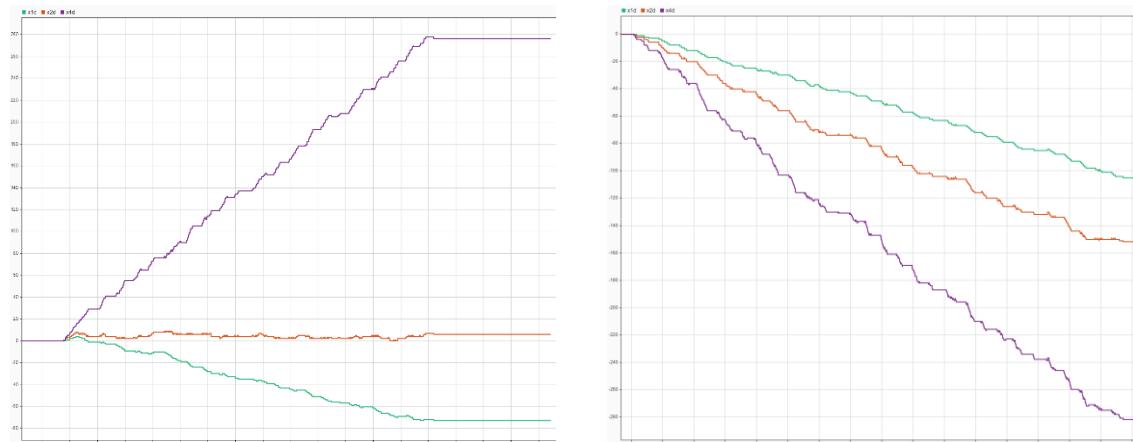
3.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 14 กราฟทิศทางการหมุนที่สัมพันธ์กับค่า Pulse จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วยวิธีการ QEI

จากการกราฟทางซ้ายเป็นการหมุน Knob ของ PEC11R-4220F-N0024 ตามเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse เพิ่มขึ้น เป็นค่าบวก และกราฟทางขวาเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse ลดลงเข้าสู่ค่าลบ

3.2 Polling Method

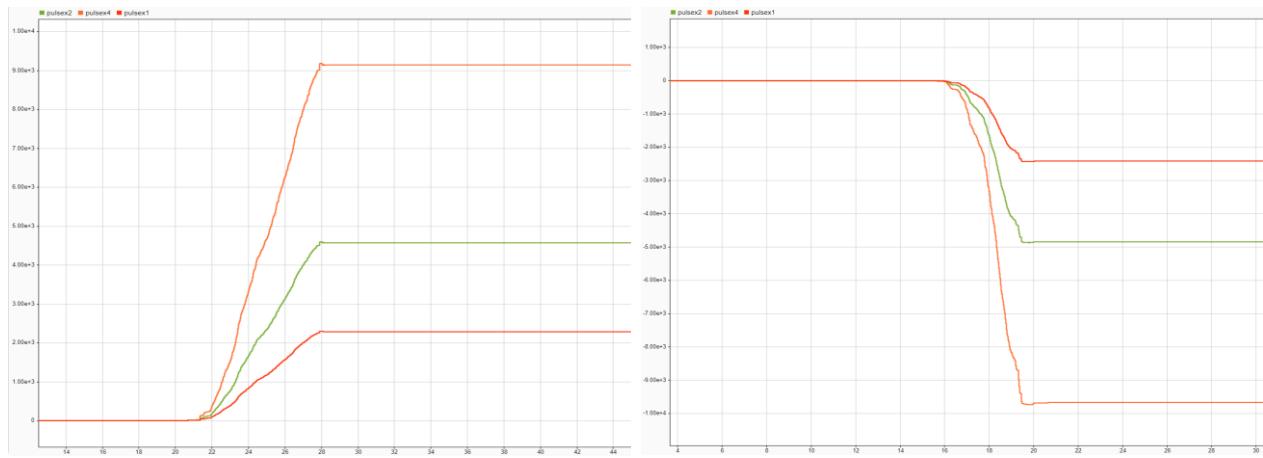


รูปที่ 15 กราฟทิศทางการหมุนที่สัมพันธ์กับค่า Pulse จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วย Polling Method

จากการกราฟทางซ้ายเป็นการหมุน Knob ของ PEC11R-4220F-N0024 ตามเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse เพิ่มขึ้น เป็นค่าบวก และกราฟทางขวาเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse ลดลงเข้าสู่ค่าลบ โดยที่บางช่วงค่าจะมีการ กลับทิศทางจากที่ควรจะเป็นเนื่องจากความเร็วในการประมวลผล Polling Method ที่ช้าเกินไปและไม่ทันที

4. การใช้ Data Inspector ในการดูทิศทางของ Pulse ของ AMT103-V

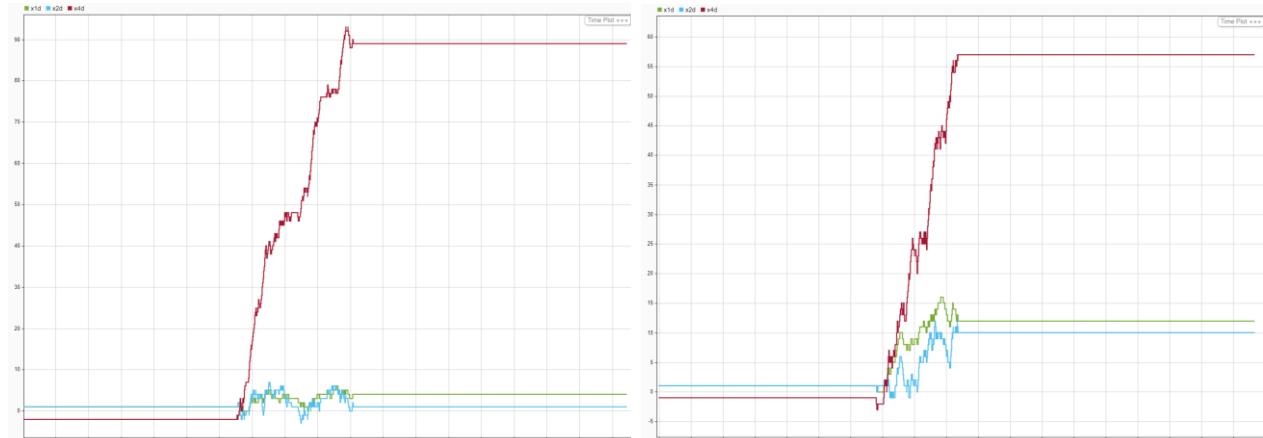
4.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 16 กราฟทิศทางการหมุนที่สัมพันธ์กับค่า Pulse จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วยวิธีการ QEI

จากการกราฟทางซ้ายเป็นการหมุน Knob ของ AMT103-V วนเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse เพิ่มขึ้นเป็นค่าบวก และกราฟทางขวาเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse ลดลงเข้าสู่ค่าลบ

4.2 Polling Method

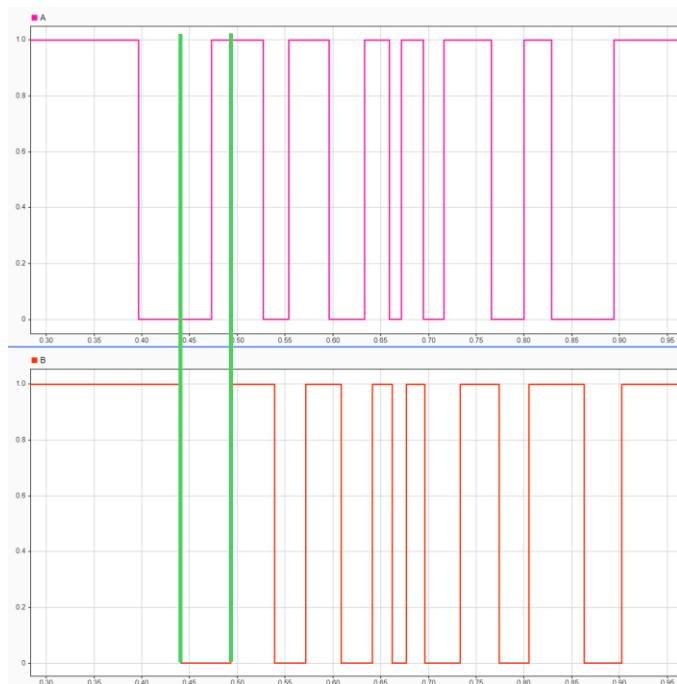


รูปที่ 17 กราฟทิศทางการหมุนที่สัมพันธ์กับค่า Pulse จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วยวิธีการ QEI

จากการกราฟทางซ้ายเป็นการหมุน Knob ของ AMT103-V วนเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse เพิ่มขึ้นเป็นค่าบวก และกราฟทางขวาเป็นการหมุนวนเข็มนาฬิกา ทำให้ Pulse ลดลงเข้าสู่ค่าลบ

5. การใช้ Data Inspector ในการดู Phase Shift ของ PEC11R-4220F-N0024

5.1 Digital Phase Shift ของ Channel A และ Channel B



รูปที่ 18 Phase Shift จาก Data Inspector ด้วยการอ่าน Pin Digital ของ Channel A และ B ของ PEC11R-4220F-N0024

จากราฟผู้จัดทำหมุน Incremental Encoder ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา กล่าวคือ Phase ของ Channel A ควรจะต้องนำ Phase ของ Channel B อยู่ 90 องศาตามอุดมคติ แต่จากการทดลองนี้พบว่า Phase ของ Channel A และ Channel B เกิด Symmetry Error และ Phase Error จากปัญหาความไม่สมบูรณ์แบบของเซ็นเซอร์ การเปลี่ยนแปลงความเร็ว และการใช้ Polling Method ก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดค่า Error ของ Phase Shift

6. การคำนวณหา Resolution ของ Incremental Encoder

$$\text{Resolution (rad/pulse)} = \frac{2\pi}{PPR}$$

จากการคำนวณของทั้งสอง Incremental Encoder ได้ค่ามาดังตารางนี้

	PEC11R-4220F-N0024	AMT103-V
Resolution (rad/pulse)	15	0.18

จะมีค่า Resolution เท่ากับ 15 และ 0.18 องศาต่อพัลลส์ตามลำดับ

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง พบร้า QEI มีความแม่นยำมากกว่า Polling Method อย่างเห็นได้ชัด ภายหลังทางผู้จัดทำจึงได้เสาะหาข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ได้ข้อสรุปสาเหตุความแตกต่างของ QEI และ Polling Method ดังตารางนี้

ตารางเปรียบเทียบ QEI และ Polling Method

	Quadrature Encoder Interface (QEI)	Polling Method
Digital/Analog	เป็นการ Interrupt เข้าไปเพื่อตรวจสอบสัญญาณ จังหวัดเร็วและแม่นยำมาก	ใช้สัญญาณดิจิทัลในการตรวจสอบสถานะของ encoder แต่มีการอ่านค่าที่ซ้ำและไม่ต่อเนื่อง
การจัดการสัญญาณ	มีความสามารถในการจัดการสัญญาณดิจิทัลจาก encoder แบบ quadrature ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการกับสัญญาณรบกวนได้ดี	อาจเกิดความล่าช้าในการอ่านค่า และมีโอกาสพลาดข้อมูลระหว่างการตรวจสอบ เพราะไม่ได้รับการอัปเดตแบบเรียลไทม์
ประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูล	สามารถอ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ทำให้เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันที่ต้องการข้อมูลแบบเรียลไทม์	ประสิทธิภาพต่ำกว่า เนื่องจากต้องรอให้ถึงเวลาที่กำหนดในการตรวจสอบสถานะ
การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง	ตอบสนองได้อย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ด้วยการใช้ Interrupt ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถดำเนินการได้ทันที	มีความล่าช้าในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากต้องรอให้มีการตรวจสอบใหม่
การใช้ทรัพยากร	ใช้ทรัพยากรระบบอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทำงานร่วมกับหลาย encoder ได้ในเวลาเดียวกัน	ใช้ทรัพยากร CPU ไปกับการ polling ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพสำหรับงานอื่น ๆ
การจัดการข้อมูลพลาด	มีระบบตรวจสอบข้อมูลพลาดที่ดีและสามารถจัดการสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า	อาจต้องใช้ทรัพยากรเพิ่มเติมเพื่อรองรับสัญญาณรบกวน และมีความเสี่ยงที่จะพลาดการเปลี่ยนแปลงสถานะ

จะเห็นได้ว่า QEI ดีกว่าในแทบทุกด้าน ยกเว้นความง่ายในการออกแบบการใช้งาน ซึ่งผู้จัดทำเองสามารถ Implement โค้ดการทำ Polling Method ได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามการใช้ QEI เหมาะสมกับการนำมาระบุกตัวจริงเมื่อเทียบกับ Polling Method ที่ไม่เหมาะสมทุกประการ

การทดลองที่ 2

การทดลองเพื่ออ่านค่า Raw Signal จาก Incremental Encoder ในรูปแบบสัญญาณ Quadrature Encoder ทุกรูปแบบและทุกวิธีการและแปลงเป็น Relative Position ด้วยการ Integrate Discrete Velocity การ Homing Incremental Encoder และความแตกต่างของ Relative Pulse และ QEI โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ตัวแปร

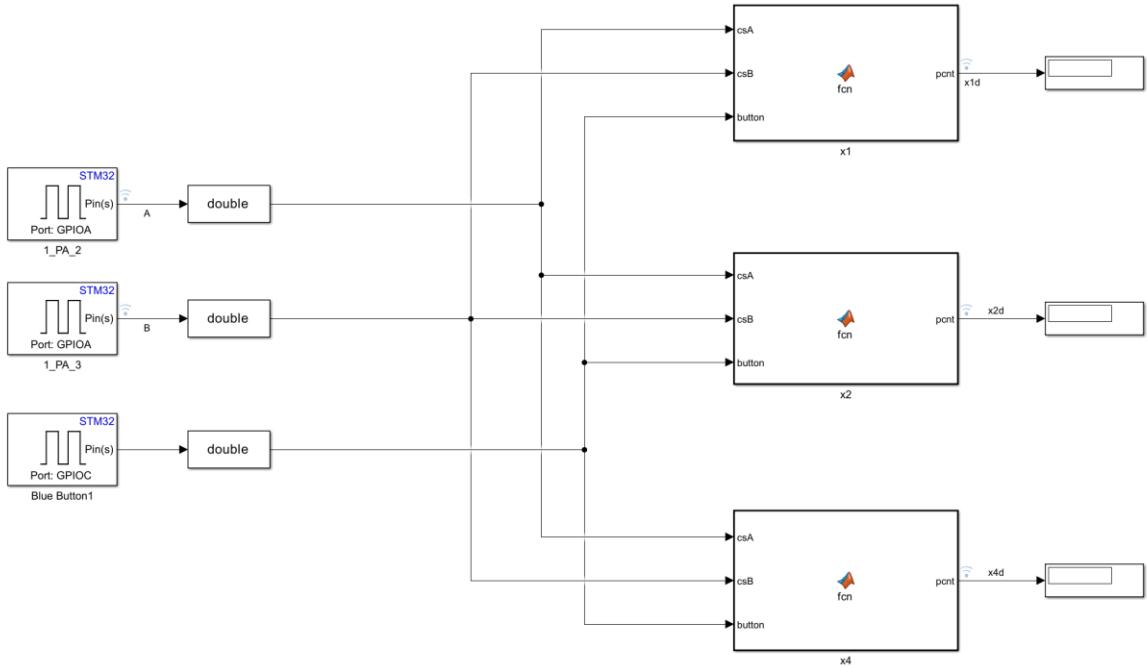
ตัวแปรต้น: ระยะทางหรือองศาการหมุนของ Encoder, สัญญาณ Homing

ตัวแปรตาม: Relative Position

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, Pulses Per Revolution

วิธีดำเนินการทดลอง

1. นำชุดการทดลองจากการทดลองที่ 1 กลับมาใช้
2. หมุน Encoder เพื่อศึกษาค่าที่ได้รับ
3. สรุป Relative Position และการ Homing Incremental Encoder



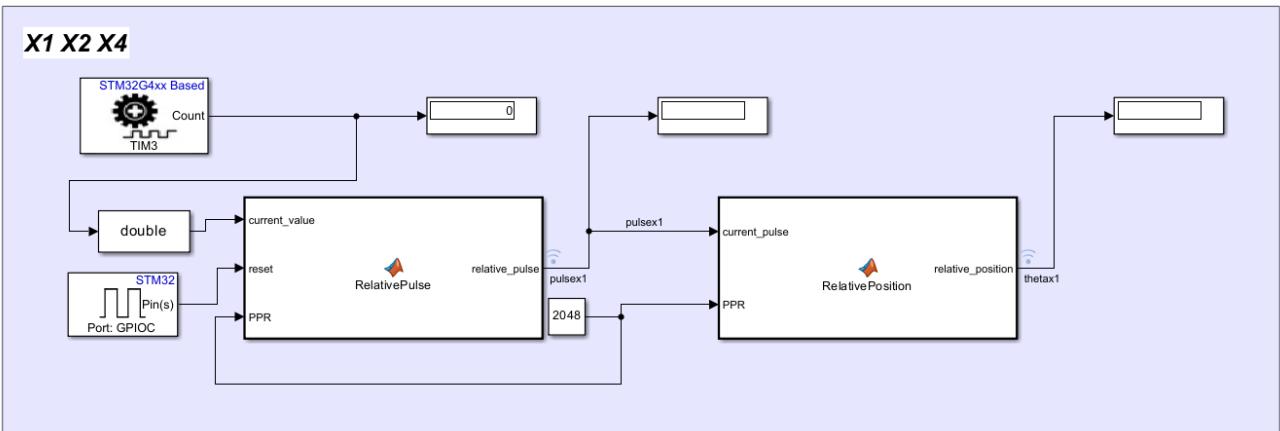
รูปที่ 19 Encoder_polling.slx

Encoder_polling.slx ทำหน้าที่อ่านสัญญาณ Digital จาก Channel A และ B ของ Encoder เพื่อนำไปเทียบขอบข่ายของสัญญาณและนับ Pulse แบบ X1, X2 และ X4 ด้วยวิธี Polling Method ซึ่งเป็นไฟล์เดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 1 แต่มีการเพิ่ม Function Homing Incremental Encoder เพื่อรีเซ็ตค่า Pulse

```
if button == 1
    pcnt_int = 0;
end
```

Code ที่ 4 เมื่ອนไชการ Homing ของ Connected IO

Code ข้างต้นเป็นการเพิ่มเงื่อนไขในการตรวจสอบการกดปุ่มสีฟ้าบน Nucleo-STM32 เข้าไปใน Function Polling Method ทั้งรูปแบบ X1, X2 และ X4 เพื่อ Homing Incremental Encoder



รูปที่ 20 Encoder_Sim3.slx เพื่อคำนวณหา Relative Pulse และ Relative Position

Simulink นี้มีการใช้ Encoder Block, Cast to Double, Digital Port Read, MATLAB Function, Constant และ Display สำหรับการคำนวณหาพัลส์สัมพัทธ์ (Relative Pulse) ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อในการหาตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative Position) และความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)

```

function relative_pulse = RelativePulse(current_value, reset, PPR)
    % Persistent variables to retain values across function calls
    persistent prev_value rollover_count max_value reset_flag pulse_offset

    % Initialize persistent variables on the first function call
    if isempty(prev_value)
        prev_value = 0;
    end
    if isempty(rollover_count)
        rollover_count = 0;
    end
    if isempty(max_value)
        max_value = 65535-(mod(65535, PPR)); % Set a default max value if not provided
    end
    if isempty(reset_flag)
        reset_flag = 0; % Track if reset has been triggered
    end
    if isempty(pulse_offset)
        pulse_offset = 0; % Offset to correct pulse on reset
    end

    % Set a default value for relative_pulse to avoid "undefined" errors
    relative_pulse = 0;

    % Threshold to detect overflow/underflow
    threshold = max_value / 2;

    % Detect overflow (encoder wrapped from high to low)
    if current_value < prev_value && (prev_value - current_value) > threshold
        rollover_count = rollover_count + 1;
    end

    % Detect underflow (encoder wrapped from low to high)
    elseif current_value > prev_value && (current_value - prev_value) > threshold
        rollover_count = rollover_count - 1;
    end

    % Calculate relative pulse
    relative_pulse = (current_value - prev_value) / PPR;

    % Adjust relative pulse for rollovers
    if rollover_count > 0
        relative_pulse = relative_pulse - pulse_offset;
    end
end

```

```

    rollover_count = rollover_count - 1;
end

% Calculate true count (absolute pulse count)
true_count = rollover_count * (max_value + 1) + current_value;

% Homing logic: align to zero on reset
if reset == 1 && reset_flag == 0
    % Set pulse_offset to the current true_count, so relative_pulse resets to 0
    pulse_offset = true_count;
    reset_flag = 1; % Set the reset flag to avoid multiple resets
elseif reset == 0
    % Clear the reset flag once the button is released
    reset_flag = 0;
end

% Calculate relative pulse with offset compensation
relative_pulse = true_count - pulse_offset;

% Update previous value for the next call
prev_value = current_value;
end

```

Code ที่ 5 MATLAB Function สำหรับการทำ Relative Pulse, Homing Incremental Encoder บนการ Run on board

โดยโค้ดนี้สามารถทำให้ค่าของ QEI สามารถขึ้นไปเกินกว่าค่า Counter Period ได้ดังในรูป และมีการทำ Homing Logic เพื่อให้สามารถเริ่มต้น Relative Pulse กลับไปเป็นค่าเริ่มต้น หรือ 0 โดยในส่วนของการ Wrapped Encoder เพื่อให้ค่าสามารถลุกขอบเขตได้ จะนำมาใช้ในการหาตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative Position) จากพัลส์ สัมพัทธ์ (Relative Pulse) ดังในโค้ดต่อไปนี้

```

function relative_position = RelativePosition(current_pulse, PPR)
    % Persistent variables to retain values across function calls
    persistent prev_pulse rollover_count max_value

    % Initialize persistent variables on the first function call
    if isempty(prev_pulse)
        prev_pulse = 0;
    end
    if isempty(rollover_count)
        rollover_count = 0;
    end
    if isempty(max_value)
        max_value = 65535-(mod(65535, PPR)); % Set a default max value if not provided
    end

    % Detect overflow (encoder wrapped from max to 0)
    if current_pulse < prev_pulse && (prev_pulse - current_pulse) > (max_value / 2)
        rollover_count = rollover_count + 1;

    % Detect underflow (encoder wrapped from 0 to max)
    elseif current_pulse > prev_pulse && (current_pulse - prev_pulse) > (max_value/2)
        rollover_count = rollover_count - 1;
    end

    % Calculate true count (relative pulse)

```

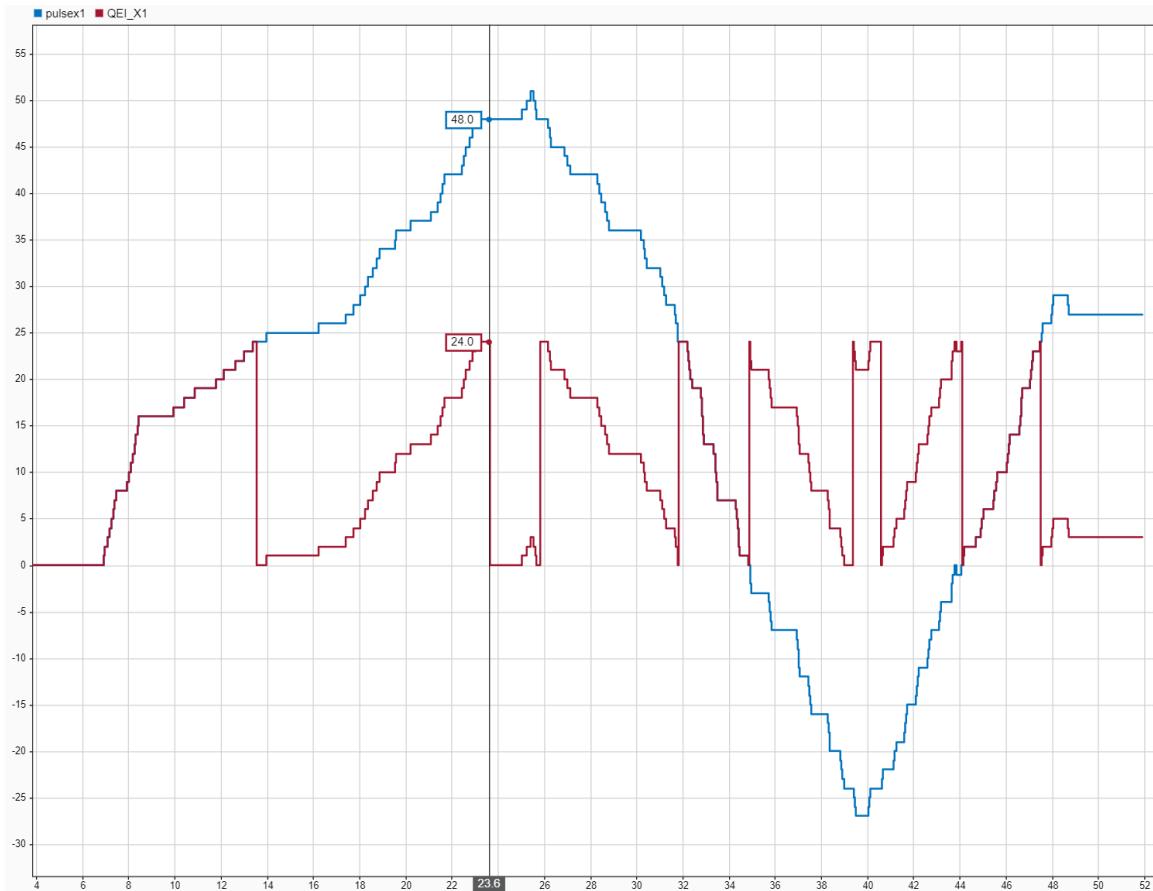
```
true_count = rollover_count * (max_value + 1) + current_pulse;  
  
% Calculate the relative position in radians (unlimited)  
relative_position = true_count * (2 * pi / PPR); % Convert to radians  
  
% Update previous value for the next call  
prev_pulse = current_pulse;  
end
```

Code ที่ 6 MATLAB Function สำหรับการทำ Relative Position

โดยโค้ดนี้สามารถทำให้พัลส์สัมพัทธ์ แปลงกล้ายเป็นตำแหน่งสัมพัทธ์ได้จากการใช้สูตรดังในหน้าเอกสารที่
เกี่ยวข้อง โดยจะออกมาในหน่วยเรเดียน

ผลการทดลองที่ 2

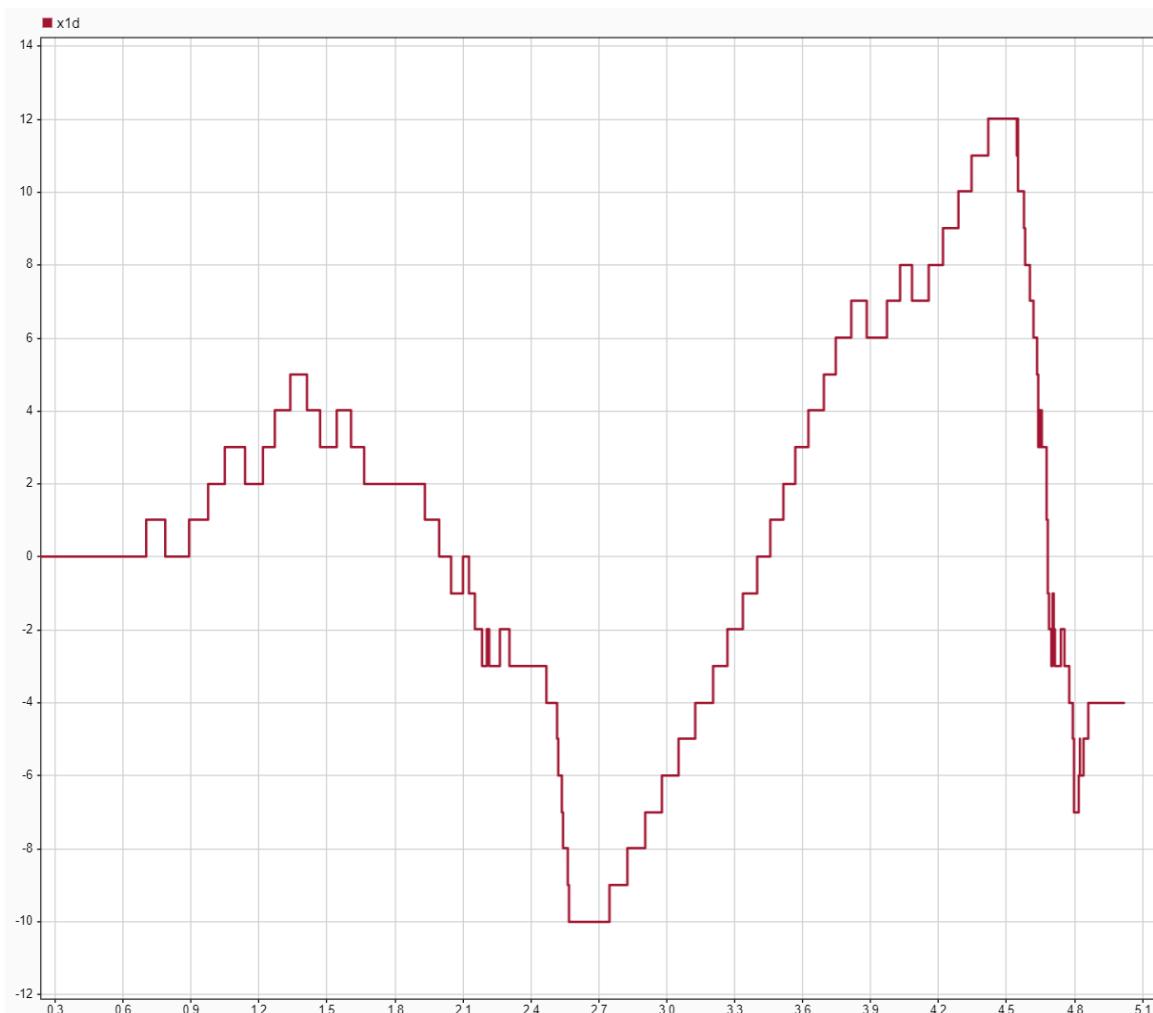
1. ความแตกต่างระหว่าง Relative Pulse และ QEI ของ PEC11R-4220F-N0024



รูปที่ 21 กราฟ Relative Pulse และ QEI จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 รูปแบบ X1

แสดงผลค่า Relative Pulse ในกรณีที่หมุนตามและทวนเข็มรูปแบบ X1 ที่สามารถนับค่า Pulse เกินค่า Counter Period ได้ ซึ่งปรับเป็น 24 เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตและยังสามารถนับไปได้แบบไม่มีที่สิ้นสุด กล่าวคือ จาก ลบอนันต์จนถึงบวกอนันต์เมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้น (ตำแหน่งที่เปิดการใช้งานจะเท่ากับ 0)

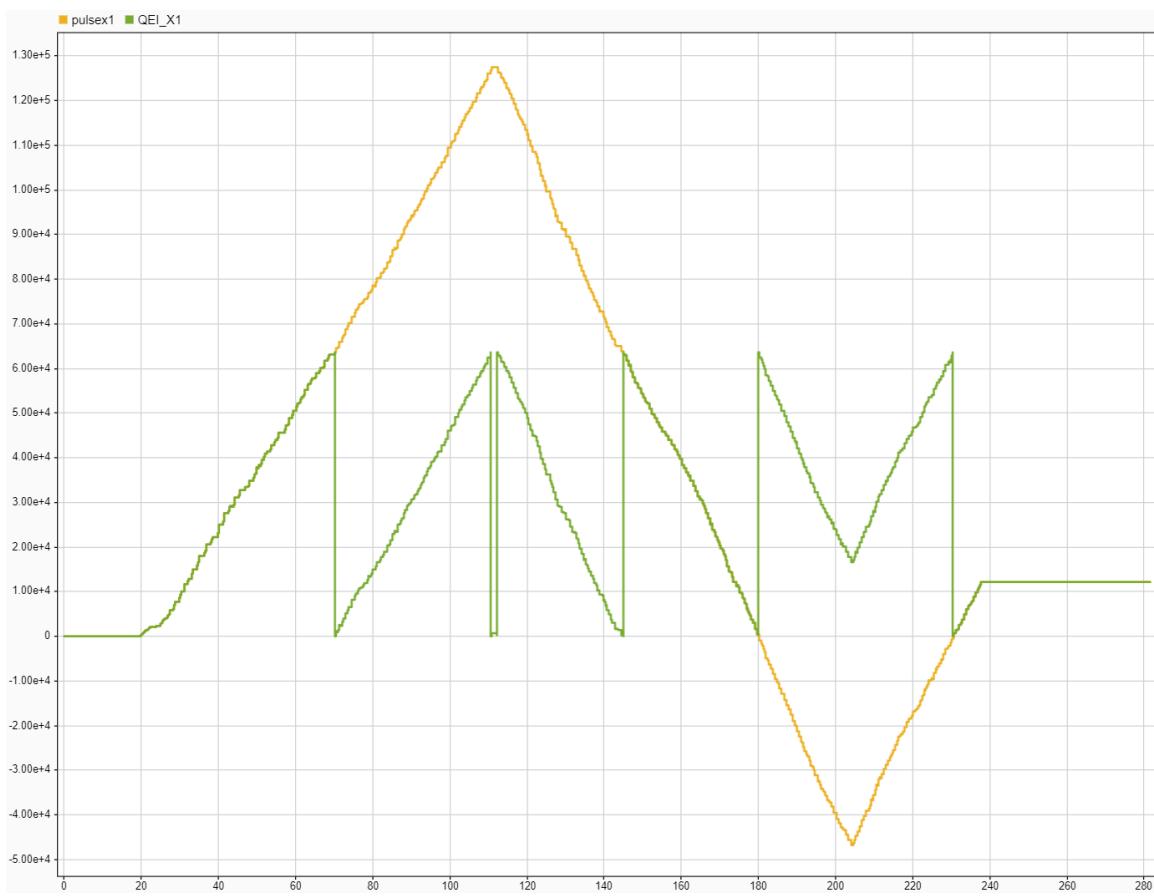
2. ความแตกต่างระหว่าง Relative Pulse ของ Polling Method ของ PEC11R-4220F-N0024



รูปที่ 22 กราฟ Relative Pulse และ Polling Method จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 รูปแบบ X1

แสดงผลค่า Relative Pulse ในกรณีที่หมุนตามและทวนเข็มรูปแบบ X1 ที่สามารถนับค่า Pulse เกินค่า Counter Period ได้ เมื่อจากเป็นวิธีการอ่านค่าแบบ Polling Method จึงไม่มีกำหนดขอบเขตอยู่แล้ว

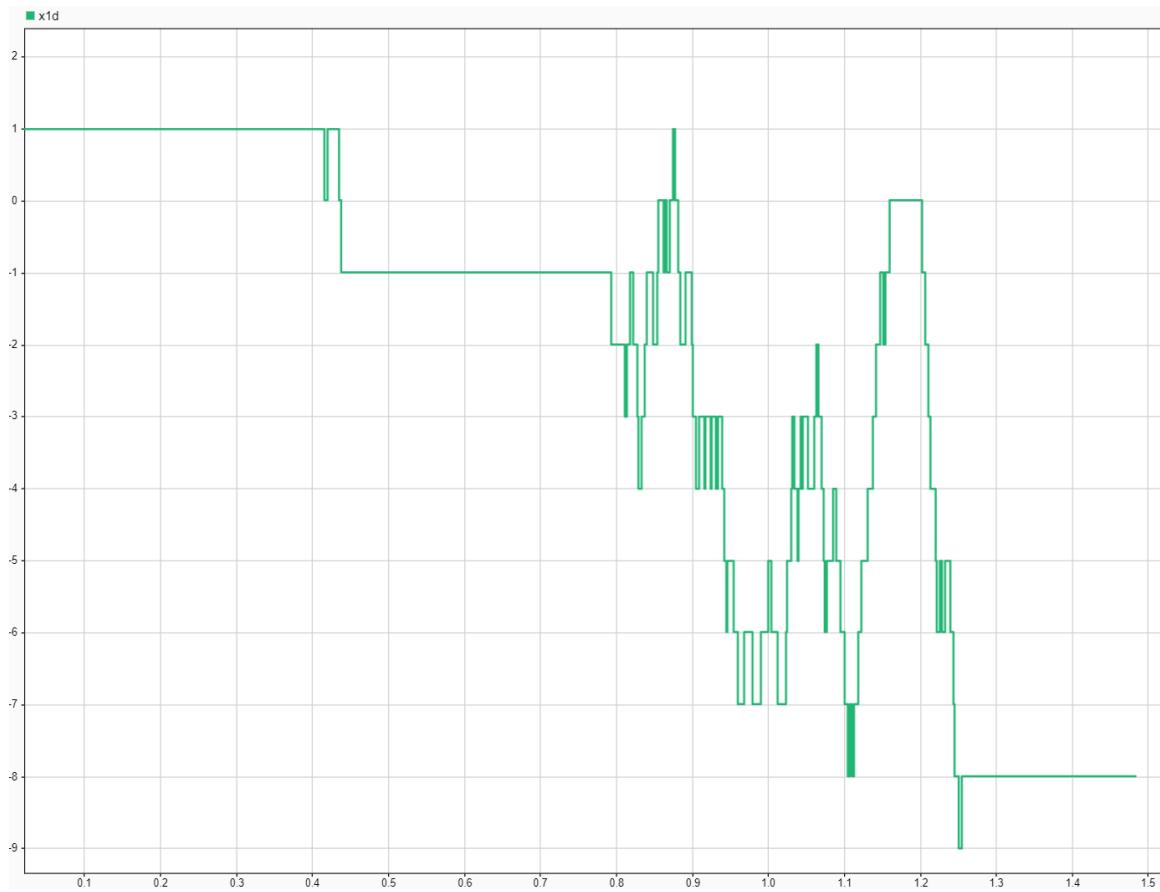
3. ความแตกต่างระหว่าง Relative Pulse และ QEI ของ AMT103-V



รูปที่ 23 กราฟ Relative Pulse และ QEI จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 รูปแบบ X1

แสดงผลค่า Relative Pulse ในกรณีที่หมุนตามและทวนเข็มรูปแบบ X1 ที่สามารถนับค่า Pulse เกินค่า Counter Period ได้ ซึ่งปรับเป็น 2048 เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตุและยังสามารถนับໄไปได้แบบไม่มีสิ้นสุด กล่าวคือ จากลบทอนนั่นต่อจนถึงบวกอนนั่นต่อเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้น (ตำแหน่งที่เปิดการใช้งานจะเท่ากับ 0)

4. ความแตกต่างระหว่าง Relative Pulse ของ Polling Method ของ AMT103-V

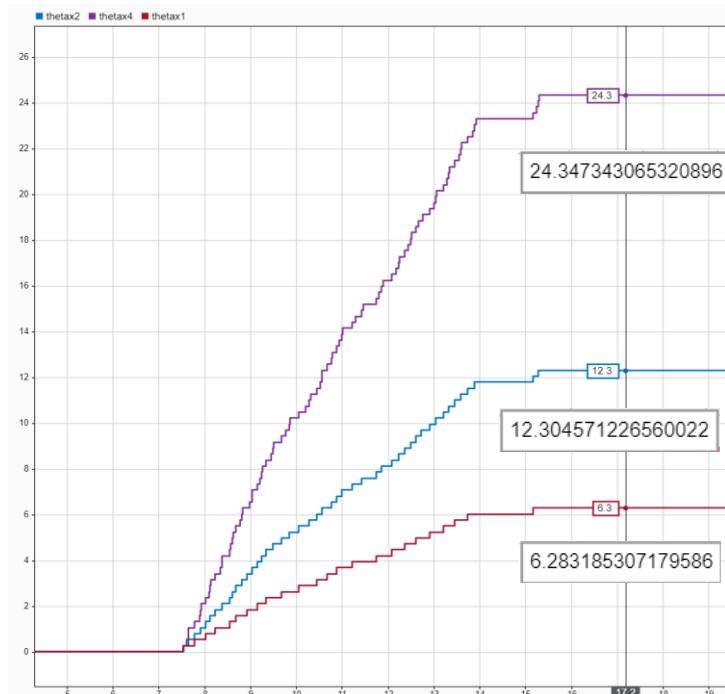


รูปที่ 24 กราฟ Relative Pulse และ Polling Method จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 รูปแบบ X1

แสดงผลค่า Relative Pulse ในกรณีที่หมุนตามและทวนเข็มรูปแบบ X1 ที่สามารถนับค่า Pulse เกินค่า Counter Period ได้ เมื่อจากเป็นวิธีการอ่านค่าแบบ Polling Method

5. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Relative Position ของ PEC11R-4220F-N0024

5.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



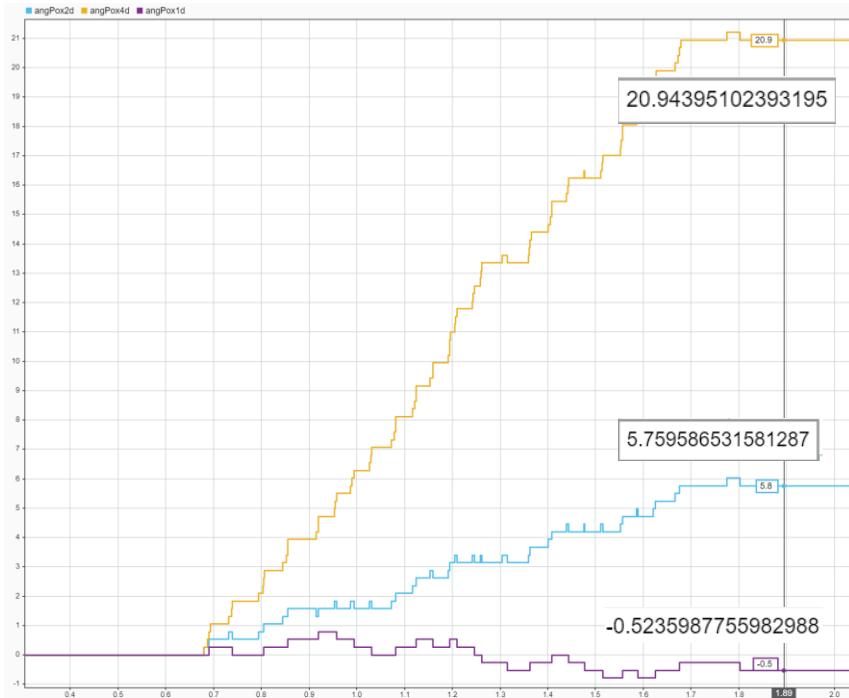
รูปที่ 25 กราฟ Relative Position จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วยวิธีการ QEI

แสดงการผลจากการคำนวณค่า Relative Position ของ PEC11R-4220F-N0024 ที่ถูกต้องของแต่ละรูปแบบ การนับได้แก่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง AMT103-V มีค่า *radian (rad)* โดยจะปัดให้เหลือเพียงทศนิยม 2 หลักดังตารางนี้ ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการคำนวณ Relative Position ด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	6.28	12.56	18.84	25.12	31.40
X2	12.30	24.60	36.90	49.20	61.50
X4	24.35	48.70	73.05	97.40	121.75

จะเห็นได้ว่าค่ามีความแม่นยำสูง เนื่องจากการใช้ QEI โดย X1 X2 และ X4 มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างชัดเจน อาจมีความผิดพลาดเล็กน้อย เนื่องจากความไม่ละเอียดของ Resolution ของ Encoder ซึ่งมีความ Resolution เท่ากับ 24

5.2 Polling Method



รูปที่ 26 กราฟ Relative Position จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วย Polling Method

แสดงการผลจากการคำนวณค่า Relative Position ของ PEC11R-4220F-N0024 ที่ถูกต้องของแต่ละรูปแบบ การนับได้แก่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง PEC11R-4220F-N0024 มีค่า *radian (rad)* โดยจะปัดให้เหลือเพียงทศนิยม 2 หลักดังตารางนี้

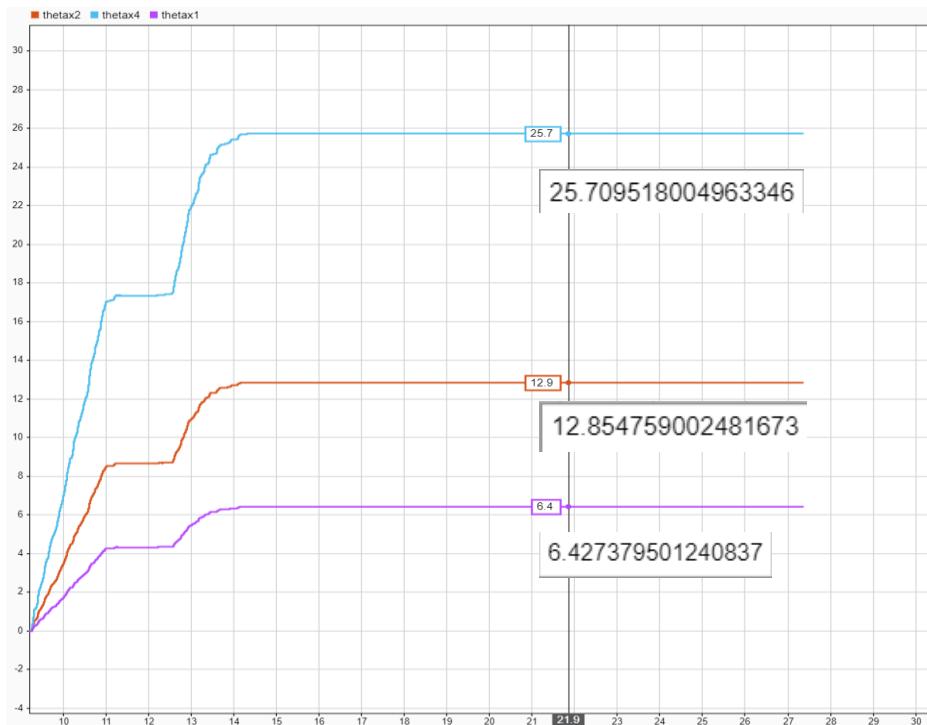
ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ Polling ในการใช้คำนวณหา Relative Position ด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	-0.52	-1.26	-1.13	0.67	2.87
X2	5.76	8.96	11.35	12.49	15.98
X4	20.94	46.37	70.42	93.41	118.34

จะเห็นได้ว่าค่ามีความแม่นยำต่ำ เนื่องจากวิธีการวัดแบบ Polling Method ที่ความละเอียดจะขึ้นกับ Sample Time หรือ Fixed Step ใน Simulink ประกอบกับ Resolution ของ Encoder ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24

6. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Relative Position ของ AMT103-V

6.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 27 กราฟ Relative Position จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วยวิธีการ QEI

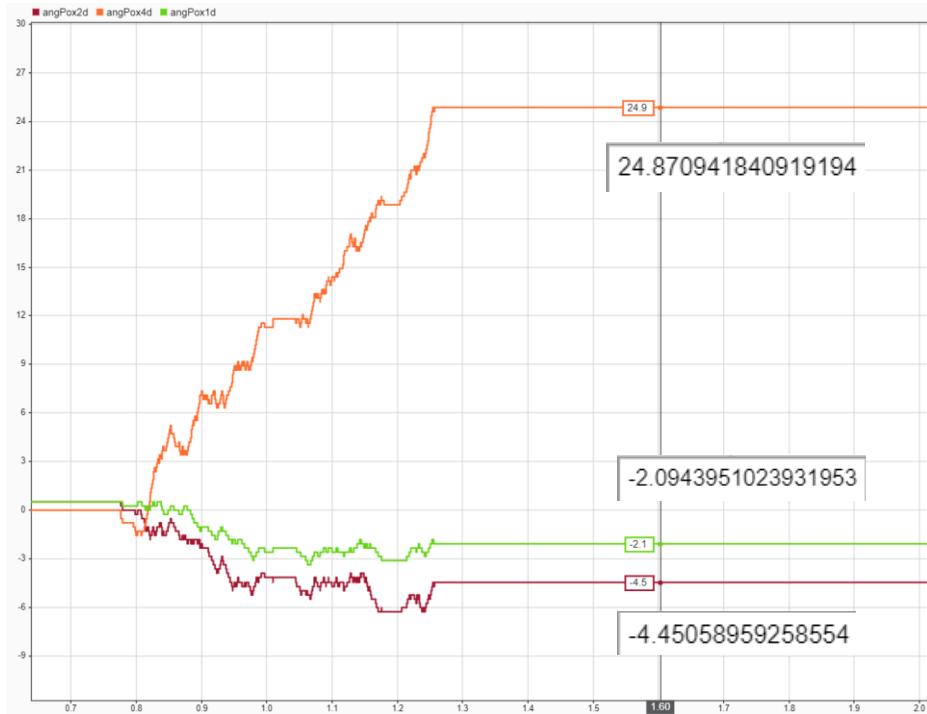
แสดงผลจากการคำนวณค่า Relative Position ของ AMT103-V ที่ถูกต้องของแต่ละรูปแบบการนับได้แก่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง AMT103-V มีค่า *radian (rad)* โดยจะปิดให้เหลือเพียงหน่วย 2 หลักดังตารางนี้

ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ QEI ในการคำนวณ Relative Position ด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	6.28	12.56	18.84	25.12	31.40
X2	12.30	24.60	36.90	49.20	61.50
X4	24.35	48.70	73.05	97.40	121.75

จะเห็นได้ว่าค่ามีความแม่นยำสูง เนื่องจากการใช้ QEI โดย X1 X2 และ X4 มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างชัดเจน ควบคู่กับ AMT103-V ที่มี Resolution สูงถึง 0.18 rad/pulse

6.2 Polling Method



รูปที่ 28 กราฟ Relative Position จาก Data Inspector ของ AMT103-V ด้วย Polling Method

แสดงผลจากการคำนวณค่า Relative Position ของ AMT103-V ที่ถูกต้องของแต่ละรูปแบบการนับได้แก่ X1 X2 และ X4 ซึ่ง AMT103-V มีค่า **radian (rad)** โดยจะปัดให้เหลือเพียงทศนิยม 2 หลักดังตารางนี้

ตารางที่ แสดงความแม่นยำของ Polling ในการใช้คำนวณหา Relative Position ด้วยรูปแบบการนับ X1 X2 และ X4

	1	2	3	4	5
X1	-4.45	-1.23	2.68	4.15	7.04
X2	-2.09	3.84	9.61	15.32	17.85
X4	24.87	33.71	41.67	48.92	56.31

จะเห็นได้ว่าค่ามีความแม่นยำต่ำ เนื่องจากวิธีการวัดแบบ Polling Method ที่ความละเอียดจะขึ้นกับ Sample Time หรือ Fixed Step ใน Simulink

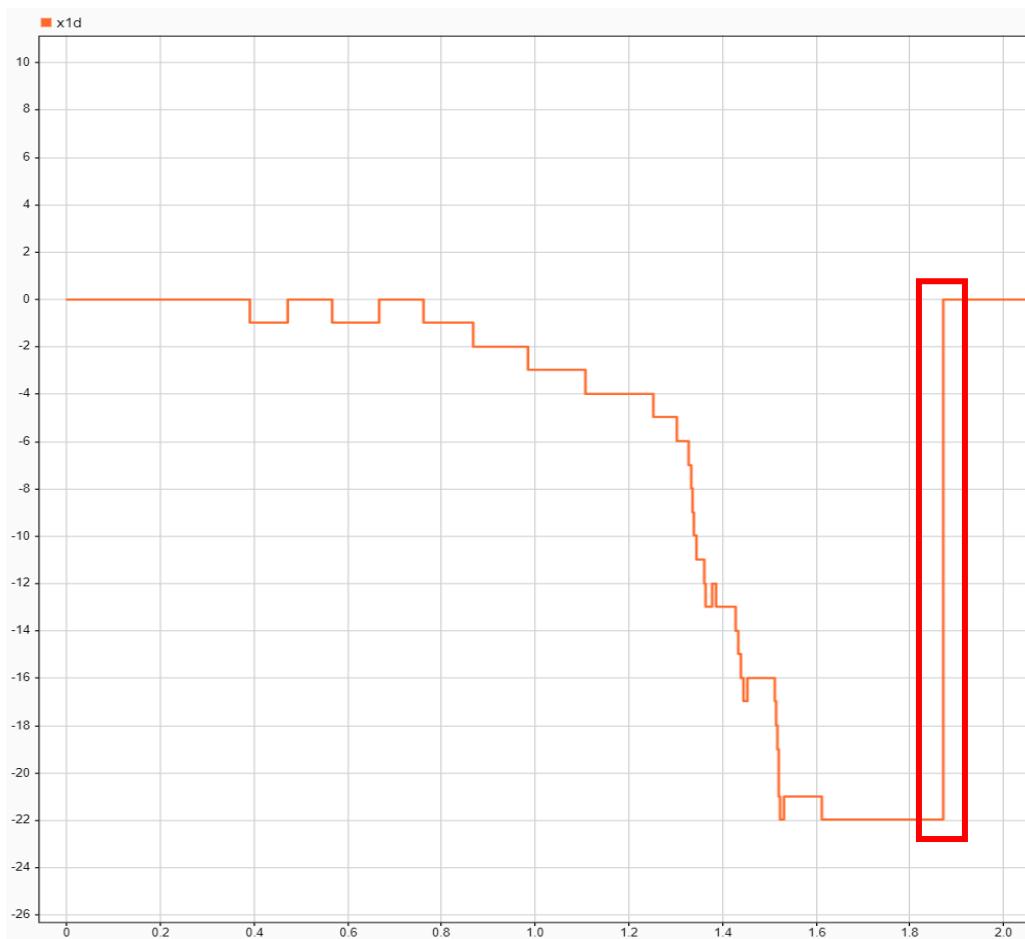
7. การทำ Homing Incremental Encoder ของ PEC11R-4220F-N0024

7.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 29 กราฟ Homing Incremental Encoder ของ PEC11R-4220F-N0024 ตัวย QEI

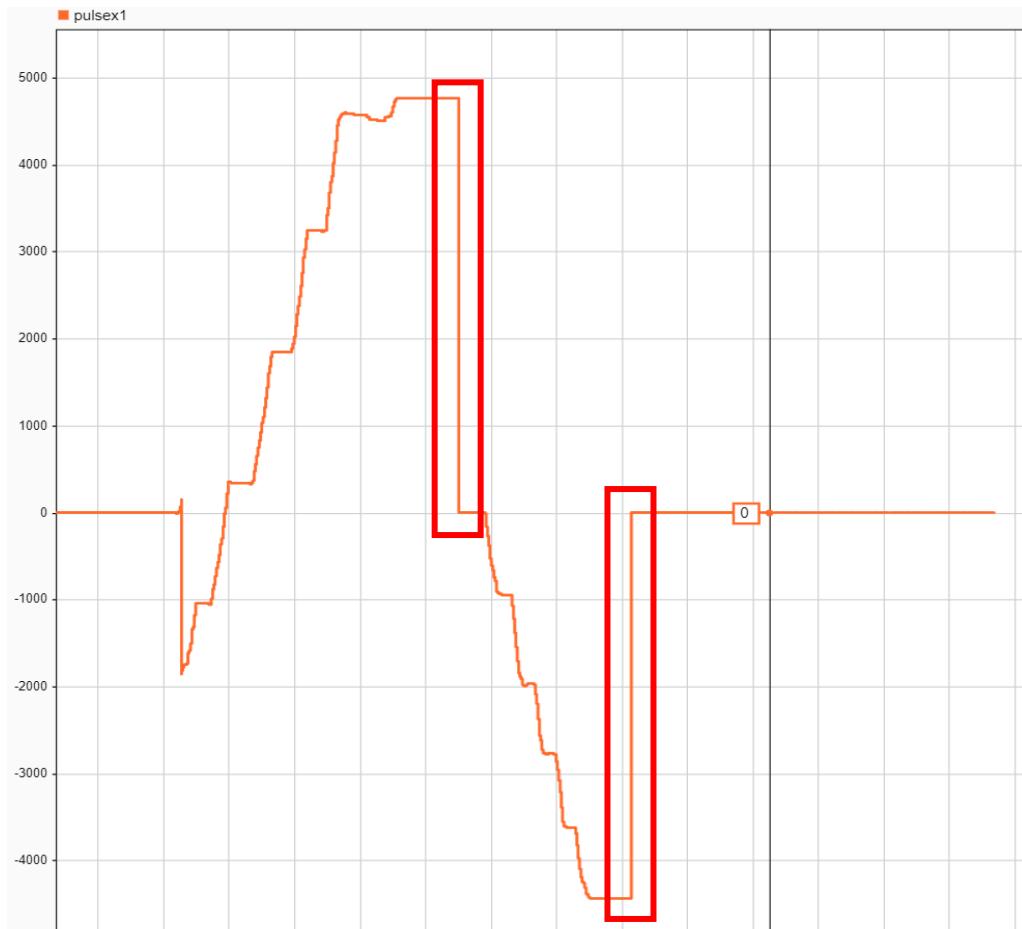
7.2 Polling Method



รูปที่ 30 กราฟ Homing Incremental Encoder ของ PEC11R-4220F-N0024 ด้วย Polling Method

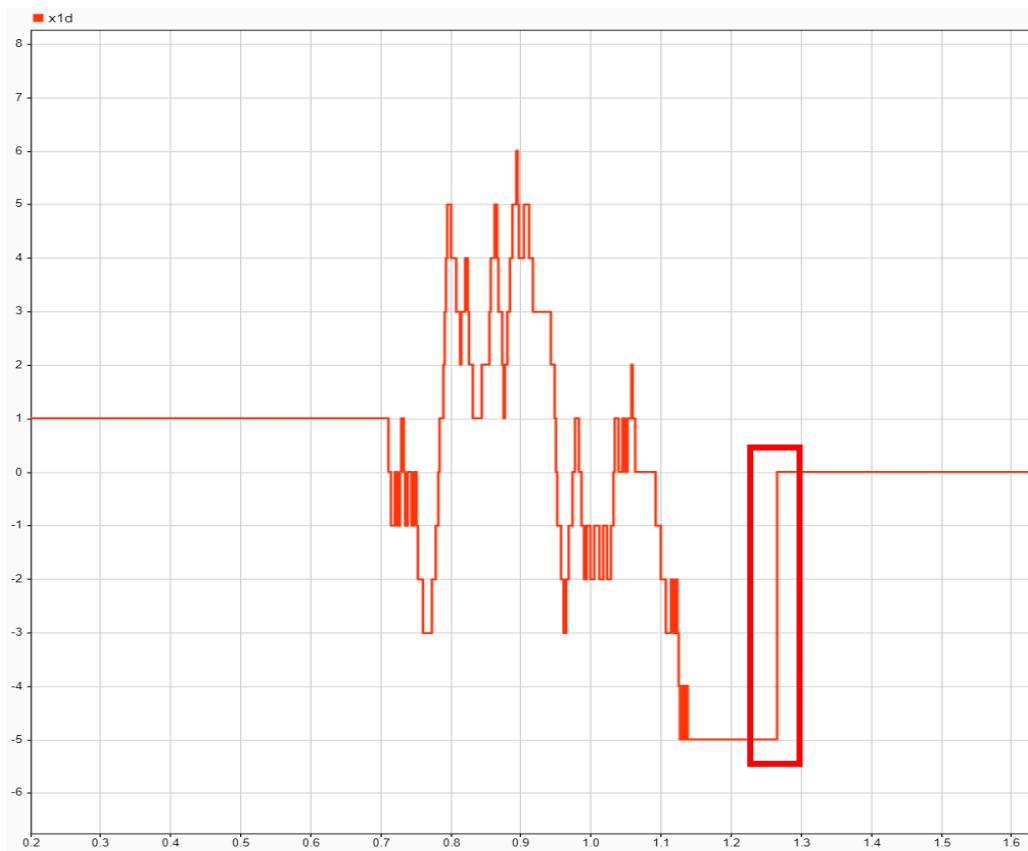
8. การทำ Homing Incremental Encoder ของ AMT103-V

8.1 Quadrature Encoder Interface (QEI)



รูปที่ 31 กราฟ Homing Incremental Encoder ของ AMT103-V ด้วย QEI

8.2 Polling Method



รูปที่ 32 กราฟ Homing Incremental Encoder ของ AMT103-V ด้วย Polling Method

สรุปผลการทดลองที่ 2

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออ่านค่า Raw Signal จาก Incremental Encoder ในรูปแบบ Quadrature Encoder เพื่อนำมาคำนวณเป็น Relative Position โดยใช้วิธีการ Integrate Discrete Velocity และทำ Homing รวมถึงศึกษาความแตกต่างระหว่างการใช้ Polling Method และ QEI Method ในการอ่านค่าสัญญาณ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านประสิทธิภาพในการอ่านค่าของทั้งสองวิธี

ในสถานการณ์ที่ Encoder หมุนด้วยความเร็วสูง หรือมีการเปลี่ยนทิศทางที่รวดเร็ว การอ่านค่าแบบ Polling อาจพลาด Pulse ไปบางส่วน ส่งผลให้การคำนวณ Relative Position มีความคลาดเคลื่อน และขาดความแม่นยำ โดยเฉพาะในกรณีที่มีความเร่งหรือความหน่วงที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

จากผลการทดลอง การใช้ QEI สามารถติดตาม Pulse ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ แม้ที่ความเร็วการหมุนสูง ทำให้ค่า Relative Position มีความถูกต้องสูง และสามารถแสดงตำแหน่งที่แท้จริงของ Encoder ได้ดีกว่า Polling Method โดยไม่มีการสูญเสียข้อมูลระหว่างการเปลี่ยนทิศทาง

การทำ Homing ใน QEI มีความแม่นยำมากกว่า เนื่องจากการใช้ Interrupt ช่วยให้สามารถบุurmaตำแหน่งเริ่มต้นได้ทันทีที่เริ่มต้นหมุน Encoder ซึ่งลดความเสี่ยงในการสูญเสียตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อเทียบกับ Polling Method ที่ต้องพึงพาความลีของ การอ่านข้อมูล

จากการทดลองพบว่า QEI Method มีประสิทธิภาพเหนือกว่า Polling Method อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในคราวของการอ่านค่าที่มีความแม่นยำ ความหน่วงต่ำ และความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วได้ดี Polling Method มีข้อจำกัดในด้านความเร็วและความแม่นยำ โดยอาจไม่สามารถติดตาม Pulse ได้อย่างต่อเนื่องในกรณีที่ Encoder หมุนเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางแบบฉับพลัน

การทดลองที่ 3

การทดลองเพื่อดูว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ตัวแปร

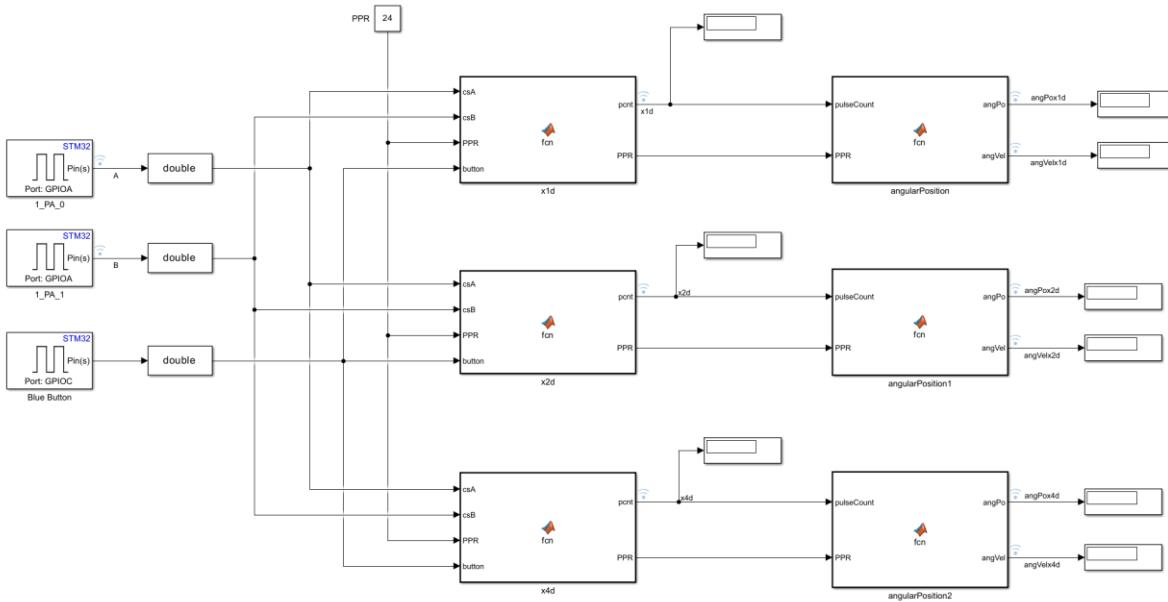
ตัวแปรต้น: ระยะทางหรือองศาการหมุนของ Encoder, สัญญาณ Homing

ตัวแปรตาม: Relative Position

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาเข้า, Pulses Per Revolution

วิธีดำเนินการทดลอง

1. นำชุดการทดลองจากการทดลองที่ 1 กลับมาใช้
2. สร้างโมเดลการคำนวณ Angular Position และ Angular Velocity
2. หมุน Encoder เพื่อศึกษาค่าที่ได้รับ
3. แสดงผล Angular Position และ Angular Velocity ผ่าน Data Inspector แบบ Real Time



รูปที่ 33 Encoder_polling.slx

Encoder_polling.slx ทำหน้าที่อ่านสัญญาณ Digital จาก Channel A และ B ของ Encoder เพื่อนำไปเทียบขอบขากของสัญญาณและนับ Pulse แบบ X1, X2 และ X4 ด้วยวิธี Polling Method พร้อมกับ Function Homing Incremental Encoder ซึ่งเป็นไฟล์เดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 2 แต่มีการเพิ่ม Function การคำนวณ Angular Position และ Angular Velocity

```

function [angPo, angVel] = fcn(pulseCount, PPR)
    % Define a persistent variable to retain previous pulse count across function calls
    persistent prev_pulseCount

    % Initialize persistent variable on the first function call
    if isempty(prev_pulseCount)
        prev_pulseCount = pulseCount;
        angVel = 0;          % Initialize angular velocity to zero
    else
        delta_pulseCount = pulseCount - prev_pulseCount;

        % Calculate angular velocity (radians per second)
        angVel = delta_pulseCount * ((2 * pi) / PPR) / 0.01;

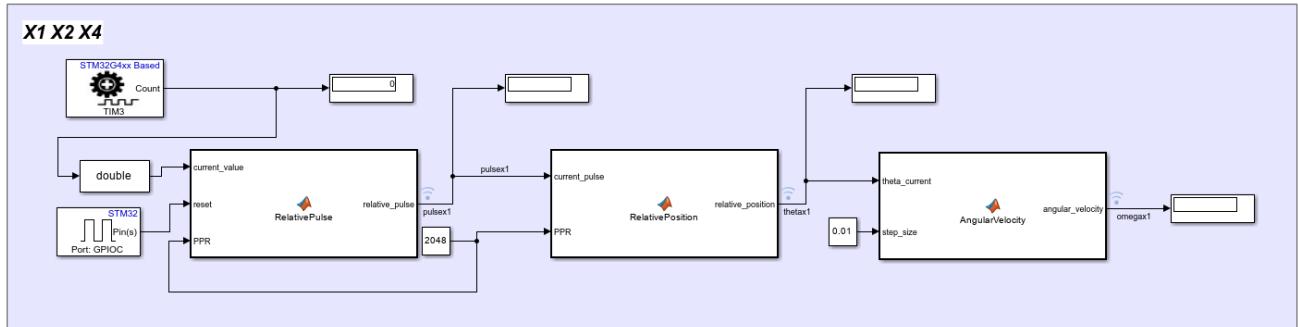
        prev_pulseCount = pulseCount;
    end

    % Calculate angular position (in radians)
    angPo = pulseCount * ((2 * pi) / PPR);
end

```

Code ที่ 7 angularCalculate Function

Code ข้างต้นเป็น Function ที่นำไปต่อเสริมจาก Output ที่มีอยู่แล้วภายในไฟล์เดิม เป็นการนำ Pulses ที่ได้จาก Polling Method ทั้งรูปแบบ X1, X2 และ X4 ไปคำนวณหาตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุม



รูปที่ 34 Encoder_Sim3.slx เพื่อคำนวณหา Angular Velocity

Simulink นี้ใช้ในการหาความเร็วเชิงมุมที่เกิดจากการนำค่าตำแหน่งสัมพัทธ์มาคำนวณหาด้วยเวลาที่เป็นค่าคงที่หรือ 0.01 จากนั้นนำค่าเหล่านี้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ Angular Velocity และ Relative Position ตามการทดลองที่ 3 ดังรูปข้างล่าง

```
function angular_velocity = AngularVelocity(theta_current, step_size)

% Persistent variable to store the previous position
persistent theta_previous;

% Initialize on the first call
if isempty(theta_previous)
    theta_previous = theta_current;
    angular_velocity = 0; % Start with zero angular velocity
    return; % Exit on the first call
end

% Calculate the change in position (delta_theta)
delta_theta = theta_current - theta_previous;

% Calculate angular velocity (degrees per second)
angular_velocity = delta_theta / step_size;

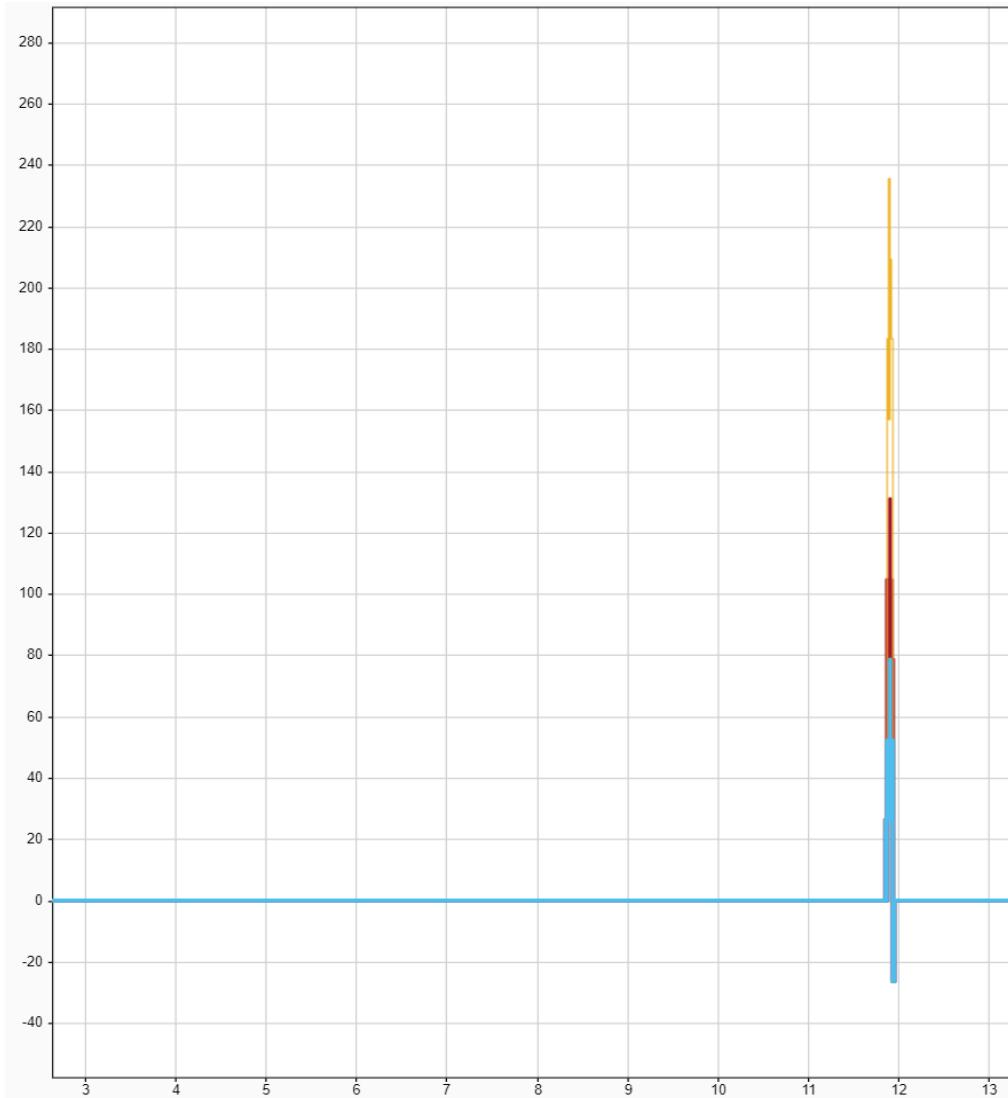
% Update the previous position for the next call
theta_previous = theta_current;
end
```

Code 8 ที่ Angular Velocity Function

ผลการทดลองที่ 3

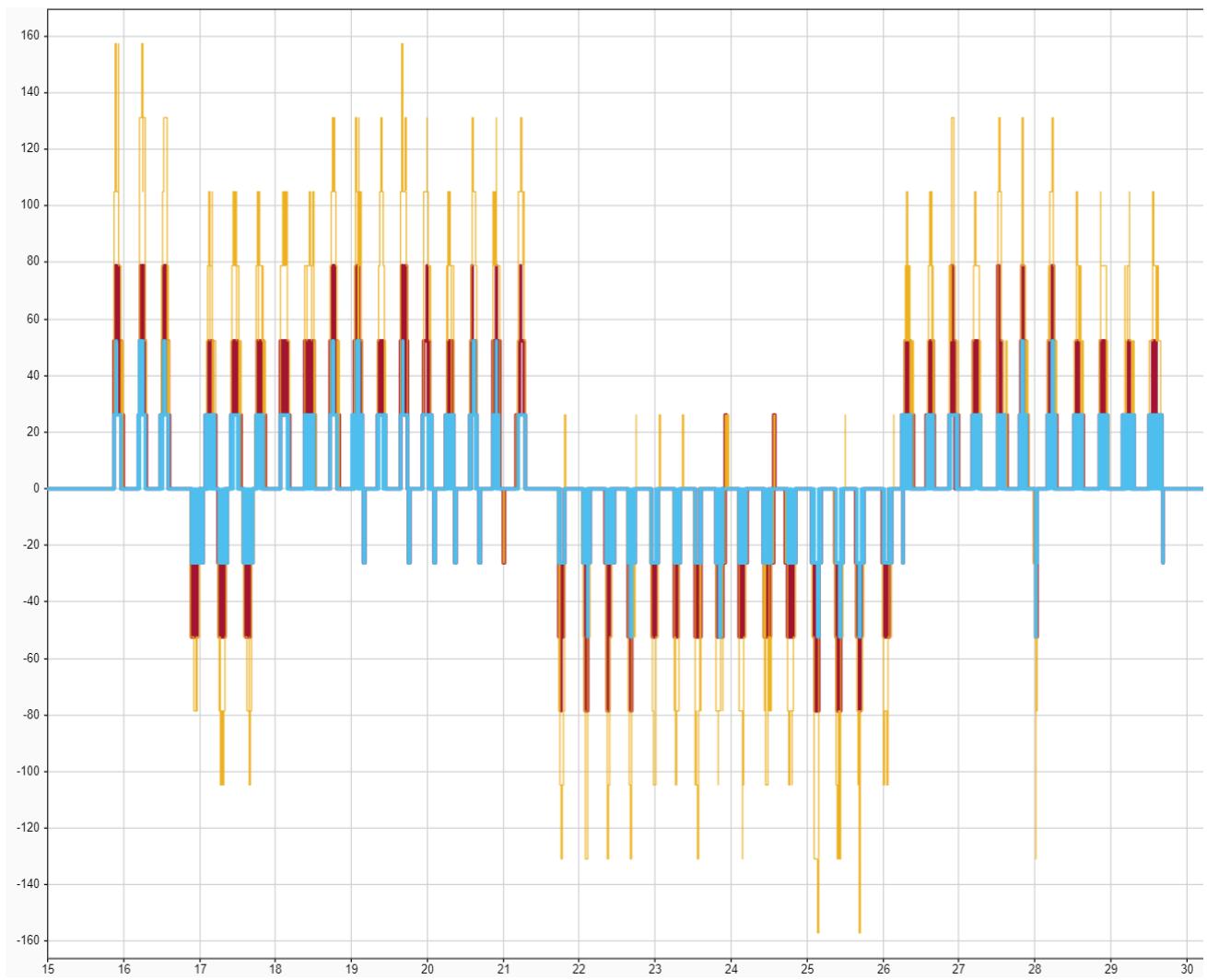
1. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Angular Velocity ของ PEC11R-4220F-N0024

1.1 Quadrature Encoder Interface (QEI) รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



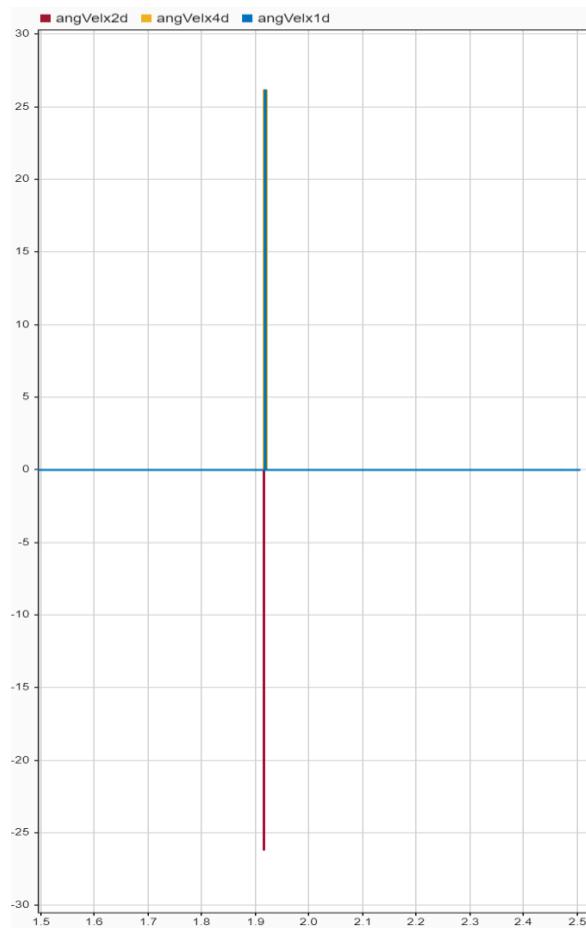
รูปที่ 35 กราฟ Angular Velocity แสดง Magnitude จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

จากราฟค่า Angular Velocity ของทั้ง X1 X2 และ X4 มีความละเอียดที่แตกต่าง กล่าวคือ ค่า X1 มีความละเอียดในการอ่านความต่างของระยะทางที่เคลื่อนที่ไปน้อยที่สุด จึงส่งผลโดยตรงต่อความเร็วเชิงมุม เพราะวิธีการนับของ X1 ที่มีการอ่านเพียงแค่ขาขึ้น ในส่วนค่า X2 มีความละเอียดในการอ่านความเร็วได้ดีกว่าแบบ X1 เพราะวิธีการนับของ X2 มีการอ่านขาขึ้นและขาลง และสุดท้ายวิธี X4 มีความละเอียดสูงสุด เพราะว่าการนับทั้งขาขึ้นและขาลงของทั้งสอง Channel (A, B)



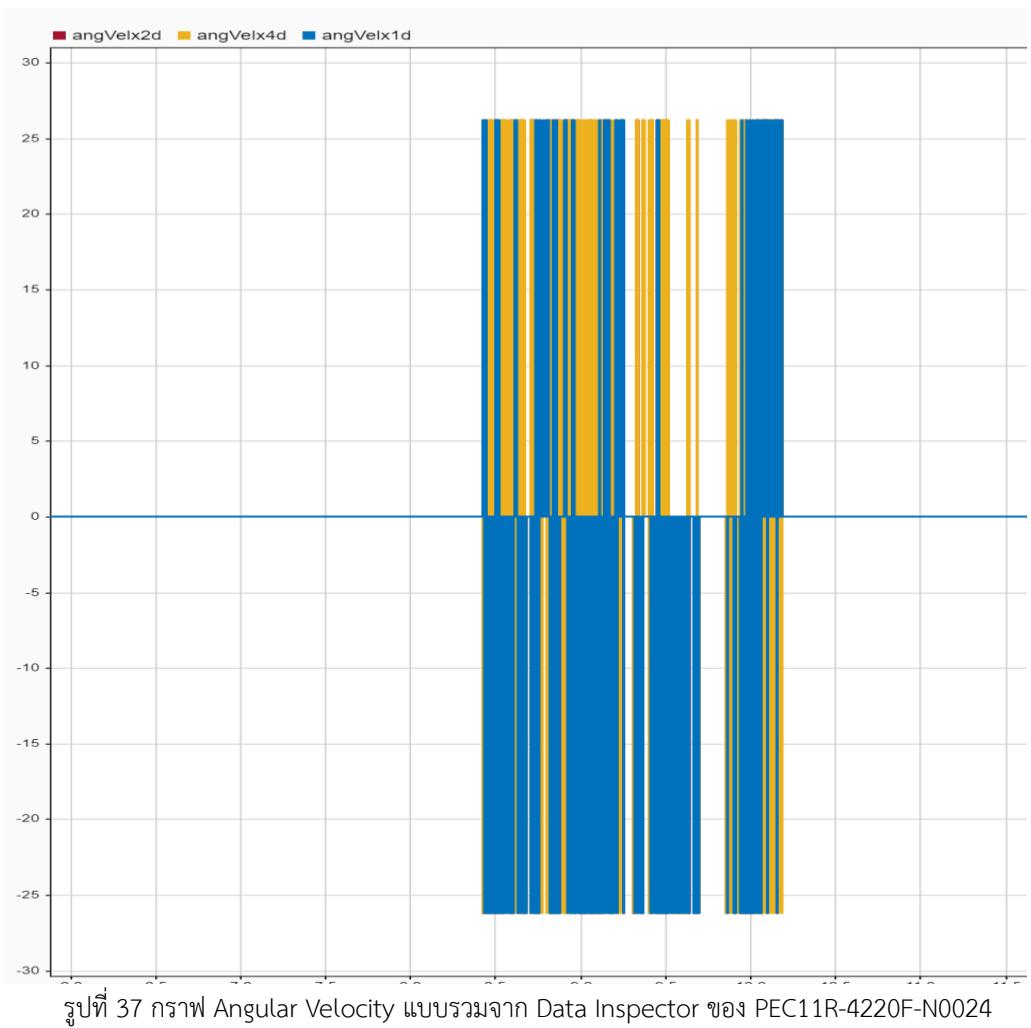
รูปที่ 32 กราฟ Angular Velocity แบบรวมจาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

1.2 Polling Method รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



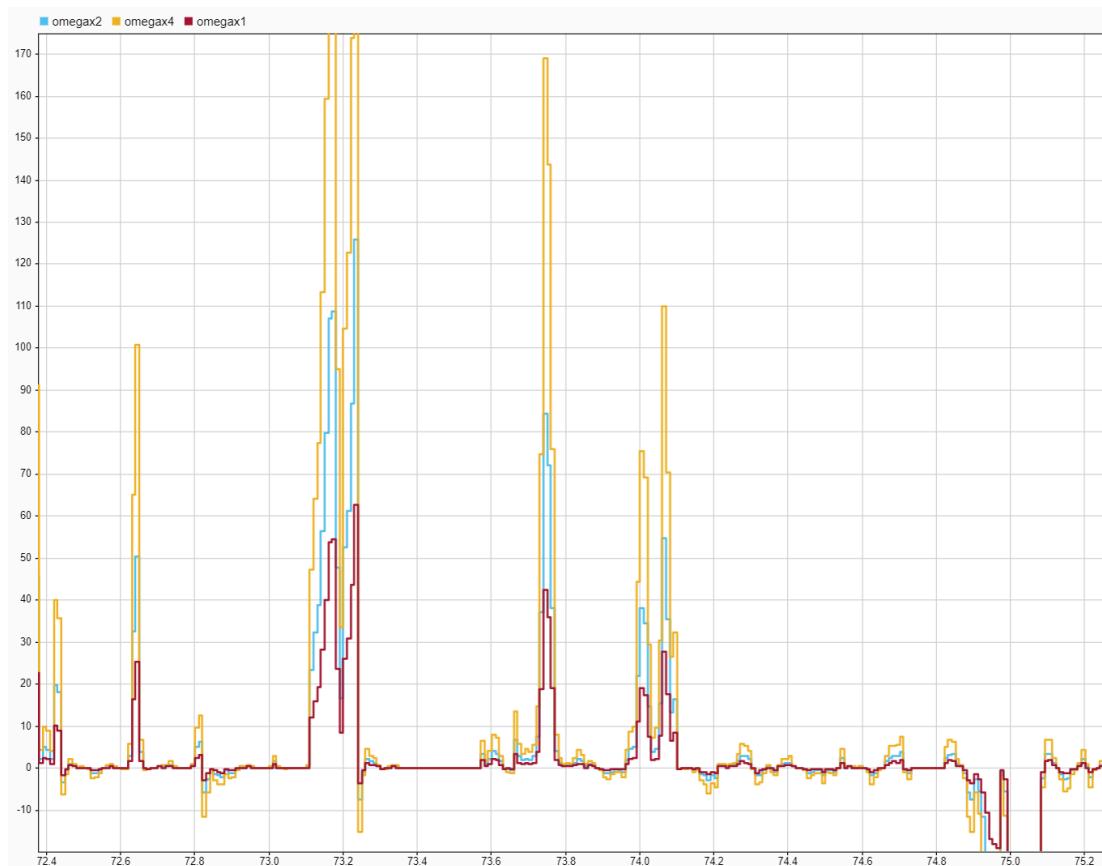
รูปที่ 36 กราฟ Angular Velocity แสดง Magnitude จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

จากราฟค่า Angular Velocity ของทั้ง X1 X2 และ X4 มีความละเอียดที่ต่ำมาก และมีความคาดเคลื่อนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังรูปภาพข้างต้น กรณีในรูป เกิดจากการหมุนก้านเพลาของ Encoder ไปในทิศตามเข็มนาฬิกา ซึ่งควรจะมีค่า Angular Velocity ที่ไปในทิศทางบวกเหมือนกัน แต่ในเหตุการณ์จริงกลับเกิดขึ้นทั้งสองฝั่ง



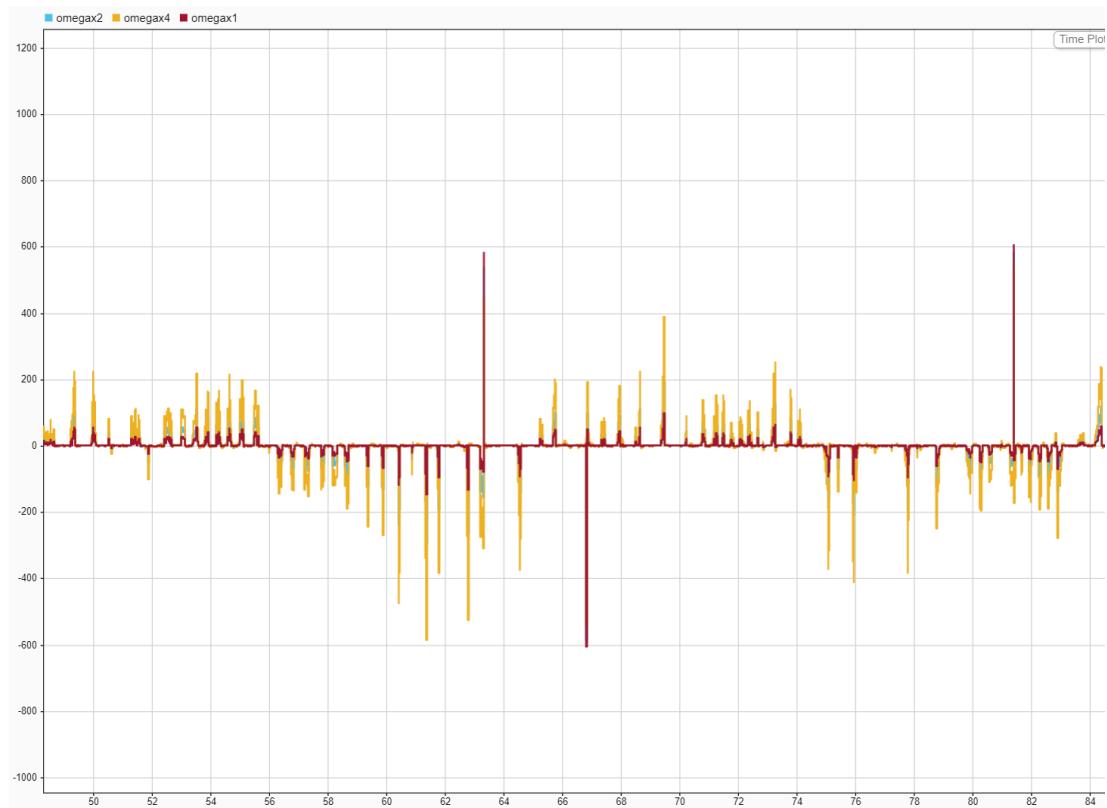
1. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Angular Velocity ของ AMT103-V

1.1 Quadrature Encoder Interface (QEI) รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



รูปที่ 38 กราฟ Angular Velocity แสดง Magnitude จาก Data Inspector ของ AMT103-V

จากราฟค่า Angular Velocity ของทั้ง X1 X2 และ X4 มีความละเอียดที่แตกต่าง กล่าวคือ ค่า X1 มีความละเอียดในการอ่านความเร็วที่น้อยที่สุด เพราะวิธีการนับของ X1 ที่มีการอ่านเพียงแค่ขาขึ้น ในส่วนค่า X2 มีความละเอียดในการอ่านความเร็วได้ดีกว่าแบบ X1 เพราะวิธีการนับของ X2 มีการอ่านขาขึ้นและขาลง และสุดท้ายวิธี X4 มีความละเอียดสูงสุด เพราะว่าการนับทั้งขาขึ้นและขาลงของทั้งสอง Channel (A, B) ซึ่งกราฟมีความละเอียดสูงมาก ด้วยสาเหตุหลักสองประการ ได้แก่ วิธีการนับ (QEI) และ Quadrature Resolution ของ Incremental Encoder



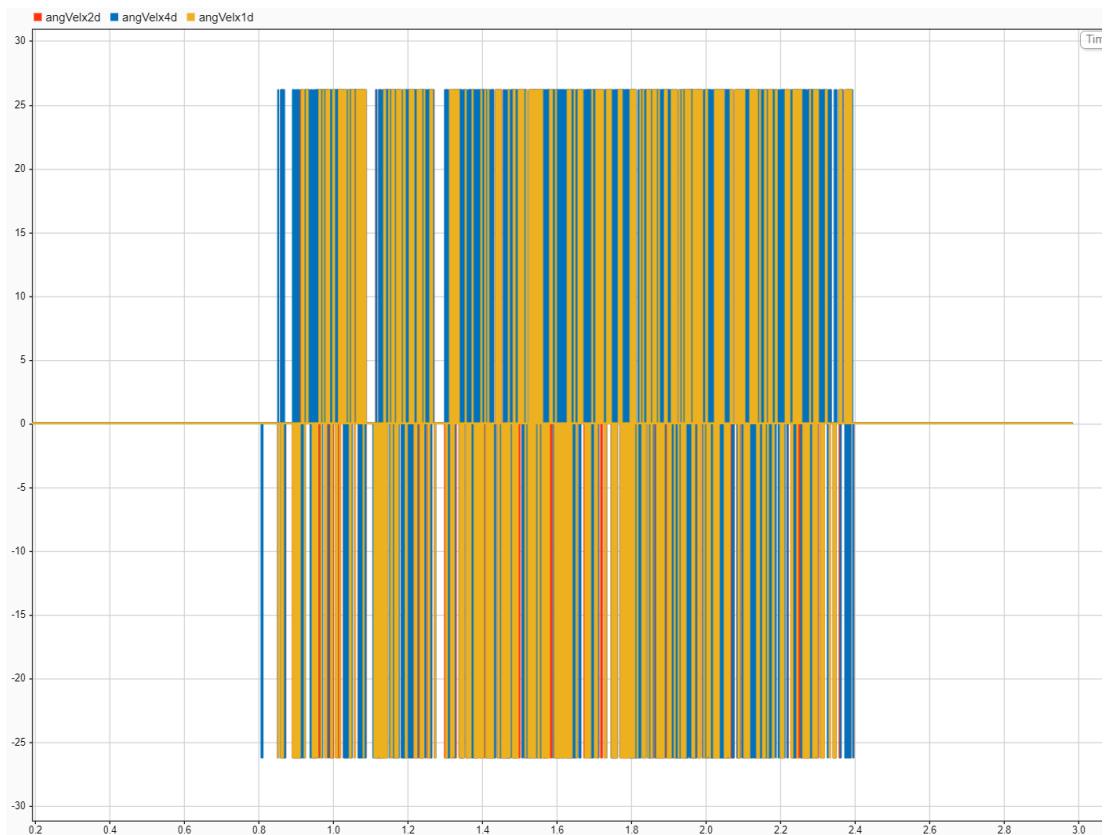
รูปที่ 39 กราฟ Angular Velocity แบบรวมจาก Data Inspector ของ AMT103-V

1.2 Polling Method รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



รูปที่ 40 กราฟ Angular Velocity แสดง Magnitude จาก Data Inspector ของ AMT103-V

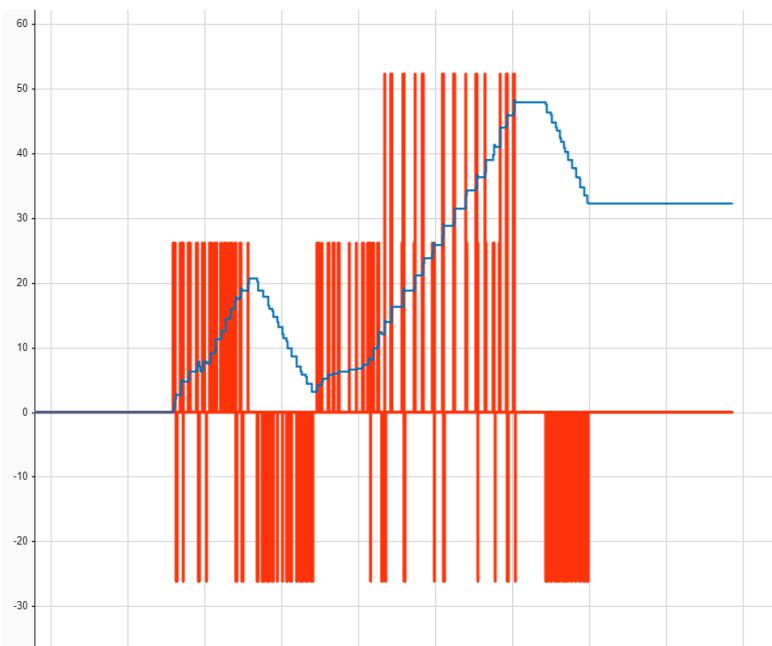
จากราฟค่า Angular Velocity ของทั้ง X1 X2 และ X4 มีความละเอียดที่แตกต่าง กล่าวคือ ค่า X1 มีความละเอียดในการอ่านความเร็วที่น้อยที่สุด เพราะวิธีการนับของ X1 ที่มีการอ่านเพียงแค่ขาขึ้น ในส่วนค่า X2 มีความละเอียดในการอ่านความเร็วได้ดีกว่าแบบ X1 เพราะวิธีการนับของ X2 มีการอ่านขาขึ้นและขาลง และสุดท้ายวิธี X4 มีความละเอียดสูงสุด เพราะว่าการนับทั้งขาขึ้นและขาลงของทั้งสอง Channel (A, B)



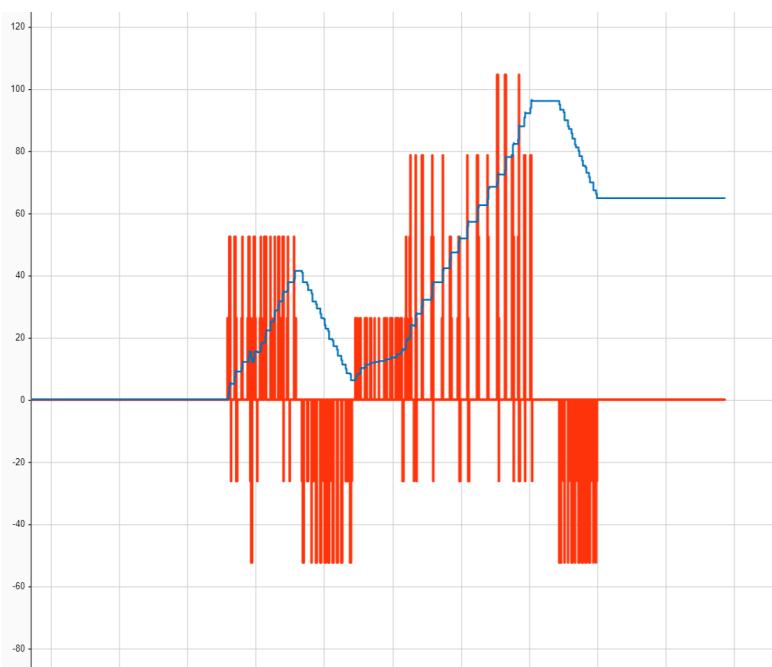
รูปที่ 41 กราฟ Angular Velocity แบบรวมจาก Data Inspector ของ AMT103-V

2. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Angular Position และ Angular Velocity ของ PEC11R-4220F-N0024

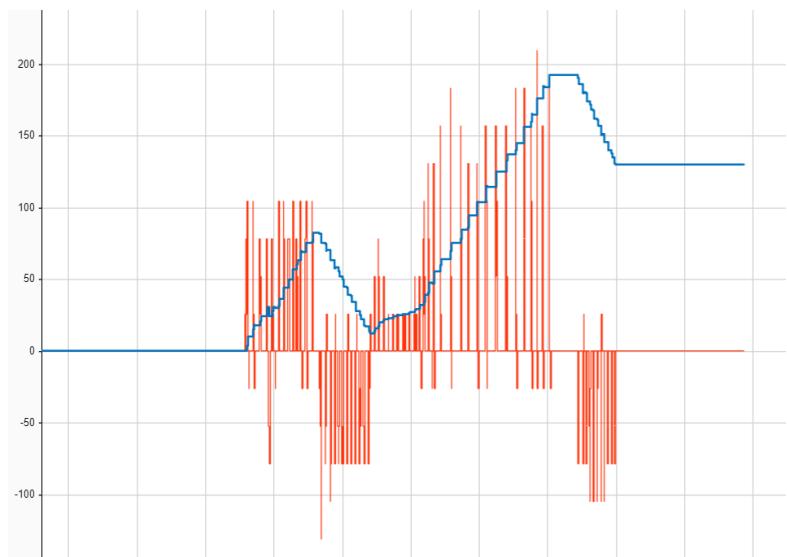
2.1 Quadrature Encoder Interface (QEI) รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



รูปที่ 42 กราฟ X1 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

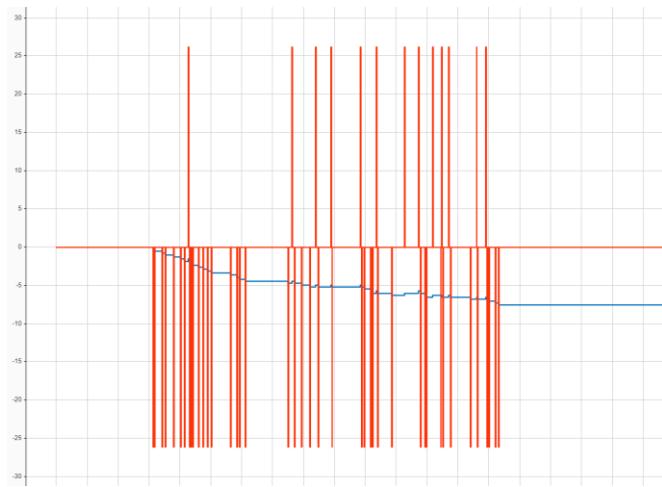


รูปที่ 43 กราฟ X2 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

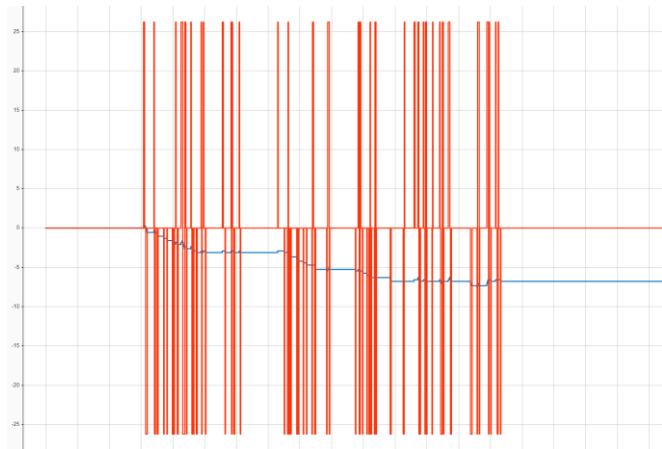


รูปที่ 44 กราฟ X4 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

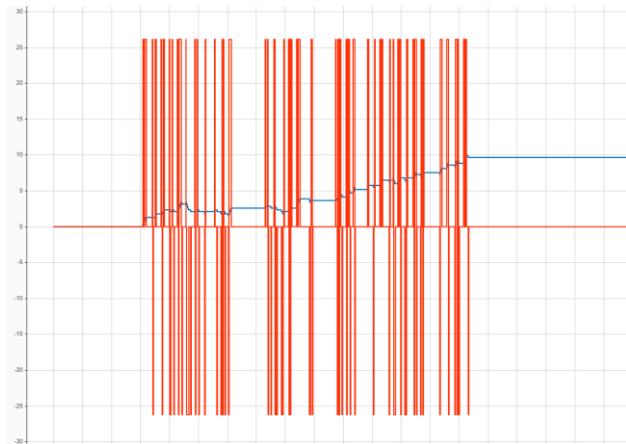
2.2 Polling Method รูปแบบ X1 X2 และ X4 ตามลำดับ



รูปที่ 45 กราฟ X1 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024



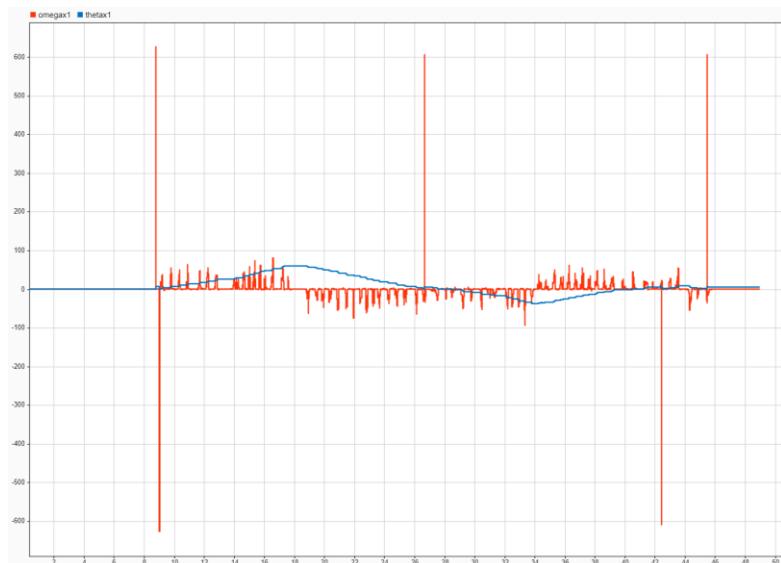
รูปที่ 46 กราฟ X2 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024



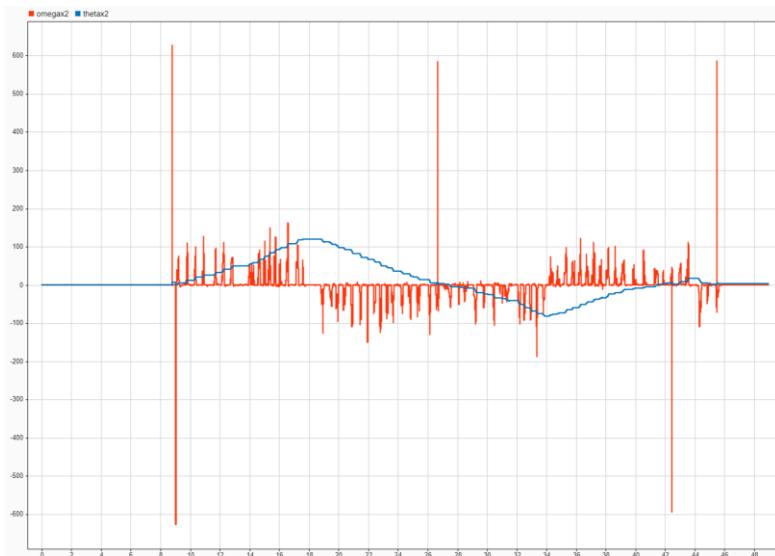
รูปที่ 47 กราฟ X2 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ PEC11R-4220F-N0024

2. การใช้ Data Inspector เพื่อแสดงผล Angular Position และ Angular Velocity ของ AMT103-V

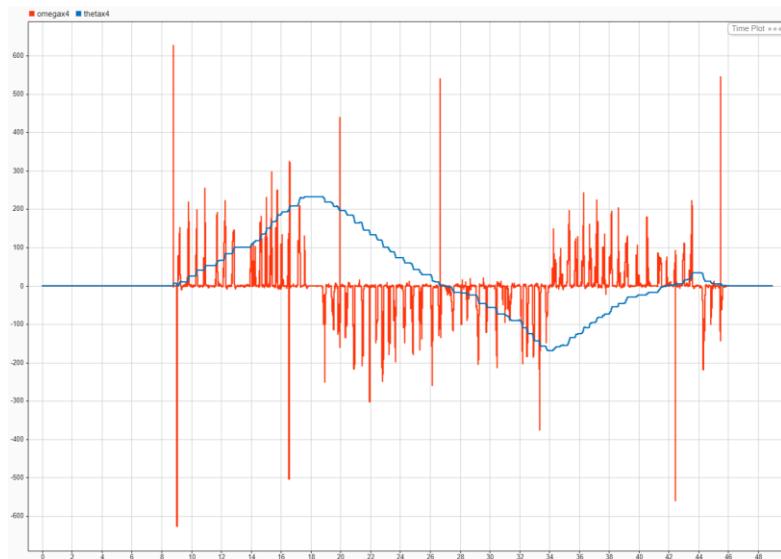
2.1 Quadrature Encoder Interface (QEI) รูปแบบ X1 X2 และ X4



รูปที่ 48 กราฟ X1 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V

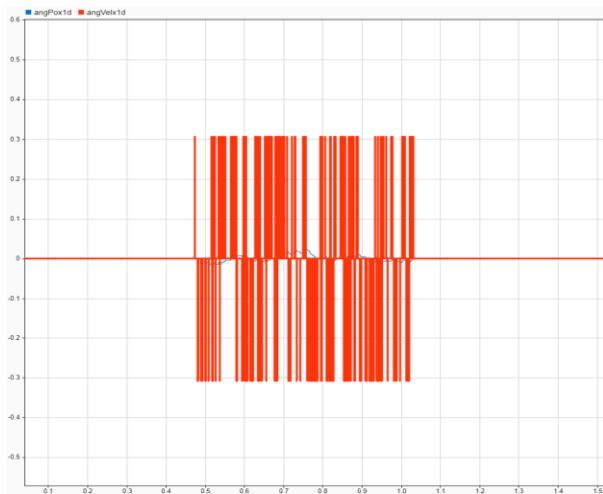


รูปที่ 49 กราฟ X2 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V

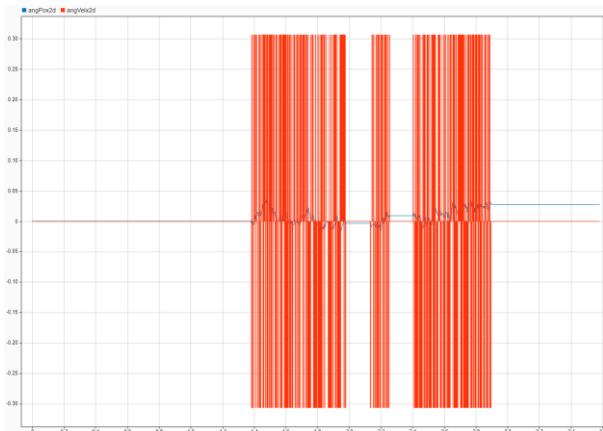


รูปที่ 50 กราฟ X4 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V

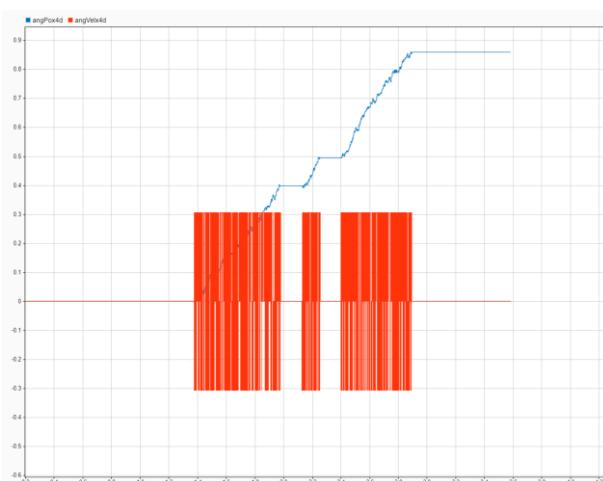
2.2 Polling Method รูปแบบ X1 X2 และ X4



รูปที่ 51 กราฟ X1 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V



รูปที่ 52 กราฟ X2 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V



รูปที่ 53 กราฟ X4 Angular Position และ Angular Velocity จาก Data Inspector ของ AMT103-V

สรุปผลการทดลองที่ 3

จากการทดลองที่ 3 ผู้จัดทำได้สำรวจข้อดีและข้อจำกัดของการใช้ Encoder ที่มีระดับความละเอียดสูงและต่ำ รวมถึงการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างวิธีการ Quadrature Encoder Interface (QEI) และ Polling Method ใน การวัดตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม แบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

ความละเอียด

1. Encoder ความละเอียดสูง (High Resolution)

ข้อดีของการใช้ Encoder ความละเอียดสูงให้ข้อมูลที่แม่นยำ เนื่องจากมีจำนวน Pulse Per Revolution (PPR) สูง ช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) และคำนวณความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ได้อย่าง ละเอียด

ข้อเสียของ Encoder ที่มีความละเอียดสูงต้องใช้พลังงานและทรัพยากรการประมวลผลมากกว่า เพราะจำนวนข้อมูล ที่ต้องจัดการมีมากขึ้น อาจส่งผลให้เกิดภาระการประมวลผลเพิ่มเติมกับระบบหลัก

2. Encoder ความละเอียดต่ำ (Low Resolution)

ข้อดีของ Encoder ที่มีความละเอียดต่ำใช้พลังงานและทรัพยากรการประมวลผลน้อยกว่า

ข้อเสียของ Encoder ความละเอียดต่ำอาจขาดความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและความเร็ว ทำให้ไม่สามารถใช้ใน งานที่ต้องการการควบคุมที่ละเอียดและความรวดเร็วในการตอบสนองได้

วิธีการอ่านค่าแบบ QEI และ Polling Method

1. Quadrature Encoder Interface (QEI)

ข้อดีของ QEI สามารถตรวจจับตำแหน่งและทิศทางได้แม่นยำ ด้วยการอ่านค่า Channel A และ B ที่มีเฟสต่างกัน ช่วยให้สามารถตรวจจับตำแหน่งได้อย่างต่อเนื่องแบบ Real-Time ซึ่งหมายความว่าสามารถรับทราบค่าได้ทันทีที่ต้องการ ความเร็วในการตอบสนองและความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์หรือระบบ Servo Motor

ข้อเสียของการใช้ QEI ต้องการฮาร์ดแวร์และทรัพยากรที่เหมาะสมเพื่อรับการประมวลผลข้อมูลความเร็วสูง ทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นกว่าการใช้ Polling Method และเพิ่มภาระในการจัดการข้อมูล

2. Polling Method

ข้อดีของ Polling Method เป็นวิธีที่ตรงไปตรงมาและไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์เฉพาะ สามารถใช้งานได้ง่ายและประหยัดทรัพยากร จึงเหมาะสมกับระบบที่ต้องการประหยัดพลังงานและไม่ได้นเน้นความเร็วในการตอบสนองสูง

ข้อเสียของ Polling Method มีความล่าช้าหากต้องตรวจสอบสัญญาณในอัตราความถี่สูง เพราะต้องอ่านค่าเป็นช่วงๆ ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำเหมือน QEI

ความสัมพันธ์ระหว่าง Angular Position และ Angular Velocity

Angular Position คือการระบุตำแหน่งเชิงมุมของ Encoder ซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเพลา ส่วน Angular Velocity เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Angular Position ในแต่ละช่วงเวลา ความละเอียดของ Encoder ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของการอ่านค่าตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม โดย Encoder ที่มีความละเอียดสูงสามารถวัดตำแหน่งได้แม่นยำขึ้น ส่งผลให้การคำนวณความเร็วเชิงมุมมีความถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งมีความสำคัญในงานควบคุมที่ต้องการความแม่นยำและการตอบสนองรวดเร็ว และจากการทดลองพบว่า เมื่อค่า Relative Pulse มีค่าบวก Angular Velocity จะมีค่าเพียงแค่ผิ่งบวกเท่านั้น ในทางกลับกันเมื่อค่า Relative Pulse มีค่าลบ Angular Velocity จะมีค่าเพียงแค่ผิ่งลบเท่านั้นเช่นกัน

อภิรายผลการทดลอง

ถ้าทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder เปลี่ยนไป สัญญาณ Output ของช่อง A และ B จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อสอดคล้องกับทิศทางการหมุน ซึ่งสามารถใช้ในการระบุทิศทางการหมุนได้

จากข้อมูลภายใน Datasheet และการทดลองที่ 1 พบว่าสัญญาณ Output ของช่อง A จะมีเฟสทางไฟฟ้าที่นำช่อง B อยู่ส่วนหนึ่ง ซึ่งมีความคงตัวทำให้สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งบอกทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder ได้

หากจำนวน Pulses Per Revolution ของ Incremental Encoder เพิ่มขึ้น Resolution ของการวัดตำแหน่ง เชิงมุมก็จะสูงขึ้นตาม ทำให้สามารถวัดตำแหน่งได้ละเอียดขึ้น

จากการทดลองที่ 1 และ 3 การเพิ่มขึ้นของ Resolution สามารถเพิ่มขึ้นได้ตาม Pulses Per Revolution โดยตรงและ Resolution เป็นหน่วยวัดความละเอียดของ Incremental Encoder อยู่แล้ว ดังนั้นหากจำนวน Pulses Per Revolution ของ Incremental Encoder เพิ่มขึ้น จะทำให้สามารถวัดตำแหน่งได้ละเอียดขึ้น

ถ้าใช้ QEI Method ในการอ่านค่าสัญญาณจาก Incremental Encoder การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมจะมีความแม่นยำและมีความหน่วงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Polling Method

หลักการทำงานของ QEI คือการใช้งาน Interrupt ซึ่งเกิดขึ้นในระดับ Analog จึงมีความหน่วงที่ต่ำกว่าการเรียกวัดค่าผ่าน Digital ซึ่งส่งผลให้สามารถวัด Pulses ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ทัน เป็นผลให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ถ้า MATLAB และ Simulink สามารถอ่านและ Log สัญญาณจาก Incremental Encoder แบบ Real-Time ได้อย่างถูกต้อง สัญญาณ Output ที่แสดงจะสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมได้ทันที

จากการทดลองที่ 3 Data Inspector สามารถแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมได้ทันที

หาก Incremental Encoder ถูกตั้งค่า Homing ถูกต้อง เมื่อตั้งค่าโปรแกรมให้ทำการ Homing Encoder จะสามารถระบุตำแหน่งเริ่มต้นที่แน่นอนและสามารถใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งในการหมุนครั้งต่อไปได้อย่างแม่นยำ

จากการทดลองที่ 2 จะสังเกตได้ว่าการ Homing คือการรีเซ็ตค่ากลับสู่ 0 จึงมีความถูกต้อง แน่นอน และสามารถใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งในการหมุนครั้งต่อไปได้อย่างแม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

- เครื่องมือสำหรับสร้างความเร็วที่คงที่ เพื่อทำให้การวัดค่ามีจุดอ้างอิง เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้
- เพลาของ AMT103-V สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อ Incremental Encoder ที่มี Resolution สูง
- มาตรวัดของ AMT103-V สามารถยืนยันองศาได้ยาก เนื่องจากการติดตั้งเพลาที่ไม่มีจุดอ้างอิง

Single Point Load Cell

วัตถุประสงค์

- ศึกษาและอธิบายหลักการทำงานของ Load Cell, วงจร Wheatstone Bridge, Strain Gauge, และ 2 Op-amps Differential Amplifier ได้
- เพื่อวิเคราะห์และอธิบายการตอบสนองของสัญญาณ Output จาก Load Cell เมื่อแรงที่กระทำต่อ Load Cell เปลี่ยนแปลงไป
- ศึกษาและอธิบายผลผลกระทบของค่า Gain และความต้านทานของ Single External Resistor ต่อความแม่นยำของการวัดค่าจาก Load Cell
- วิเคราะห์และอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning ได้อย่างละเอียด ตั้งแต่การปรับค่า การ Calibrate Sensor และวิธีการจัดการข้อมูล รวมถึงการคำนวณแรงที่กระทำต่อ Load Cell ก่อนและหลังผ่าน INA125
- ศึกษาการเขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB และ Simulink เพื่อรับและแสดงผลสัญญาณ Output ของ Load Cell ผ่านบอร์ด Nucleo STM32G474RE แบบ Real-Time โดยแสดงผลเป็นกราฟและค่าในหน่วย SI derived

สมมติฐาน

- เมื่อมีแรงกระทำต่อ Load Cell เพิ่มขึ้น ค่าของสัญญาณ Output ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่สอดคล้องกับการตั้งค่า Gain ของ Differential Amplifier ที่ใช้ร่วมกัน
- การปรับค่า Gain จากค่าความต้านทานของ Single External Resistor สูงขึ้น สัญญาณ Output จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเล็กน้อยได้ละเอียดยิ่งขึ้น
- ถ้า MATLAB และ Simulink รับสัญญาณจาก Load Cell ที่เชื่อมต่อกับ INA125 Instrumentation Amplifier ผ่านบอร์ด Nucleo STM32G474RE ได้แบบ Real-Time จะสามารถแสดงความเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำต่อ Load Cell ได้ทันที ทำให้สามารถตรวจสอบค่าของแรงในหน่วย SI derived ได้อย่างถูกต้อง
- เมื่อทำการ Calibrate Load Cell และ Signal Conditioning อย่างถูกต้อง สัญญาณ Output ที่ได้จาก Load Cell ที่เชื่อมต่อกับ Differential Amplifier จะสามารถใช้ในการคำนวณแรงที่กระทำต่อ Load Cell ได้อย่างแม่นยำ

นิยามเชิงปฏิบัติการ

Nucleo-STM32	คือ Nucleo-STM32G474RE
LoadCellXplorer	คือ ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Incremental Encoder, 3D-Print ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไม้เพรแทกเตอร์บอร์ดทดลอง
สายจ้มเปอร์	คือ สายไฟฟ้า หรือกลุ่มสายในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อหรือพินที่ปลายแต่ละด้าน
Noise	คือ สัญญาณไฟฟ้าในวงจรที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากสัญญาณที่ได้ออกแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า
Ground	คือ จุดอ้างอิงทางไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดัน 0V
Data Inspector	คือ Function ภายใน MATLAB ซึ่งสามารถแสดงค่าของสิ่งที่สนใจเทียบกับเวลาได้แบบ Real-Time
MATLAB	คือ แพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์
Simulink	คือ สภาพแวดล้อมแบบ Block Diagram สำหรับการออกแบบบดมเดลหลายโอดเมน
สายอัปโหลด	คือ สาย USB-A ถึง Micro-USB สำหรับส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และ Nucleo-STM32G474RE
Pin	คือ ช่องเชื่อมต่อนบ Nucleo-STM32G474RE ซึ่งสามารถทำงานได้หลาย Function
Code	คือ ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์
.m	คือ นามสกุลไฟล์ MATLAB
.slx	คือ นามสกุลไฟล์ Simulink
แรงดันขาออก	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ใด ๆ มีหน่วยเป็น โวลต์ (<i>Volt, V</i>)
Analog	คือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป มีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกัน
Digital	คือ สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอนซึ่งขนาดตั้งกล่าวจากระโดดไปまるหัวใจค่าสองค่า คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิตอลนี้เป็นสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการทำงานและติดต่อสื่อสารกันเป็นค่าของเลขลงตัว โดยปกติมักแทนด้วยระดับแรงดันที่แสดงสถานะเป็น "0" และ "1"

นิยามคัพท์เฉพาะ

แปรผันตรง

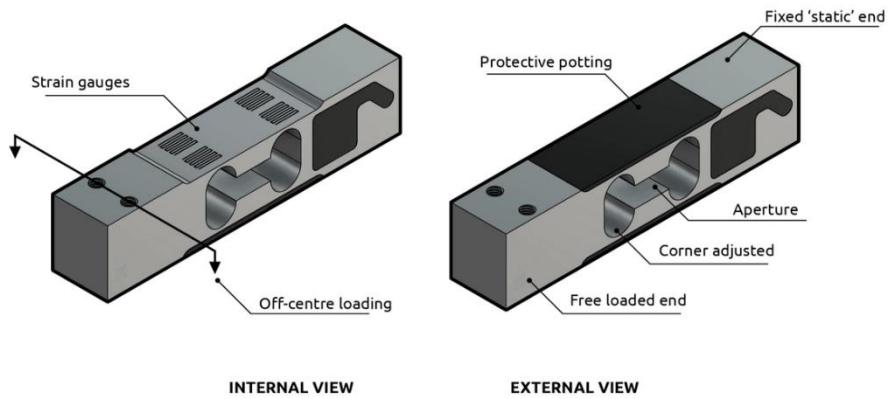
คือ ความสัมพันธ์ระหว่างของสองสิ่งหรือปริมาณสองปริมาณ เมื่อสิ่งหนึ่งเพิ่มอีก สิ่งหนึ่งก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเป็นสัดส่วนกัน หรือเมื่อสิ่งหนึ่งลดอีกสิ่งหนึ่ง ก็ลดลงตามไปด้วยอย่างเป็นสัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันตามกัน หรือ การ แปรผันตรง หรือ เป็นสัดส่วนโดยตรง

Linear

คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Single Point Load Cell คืออะไร

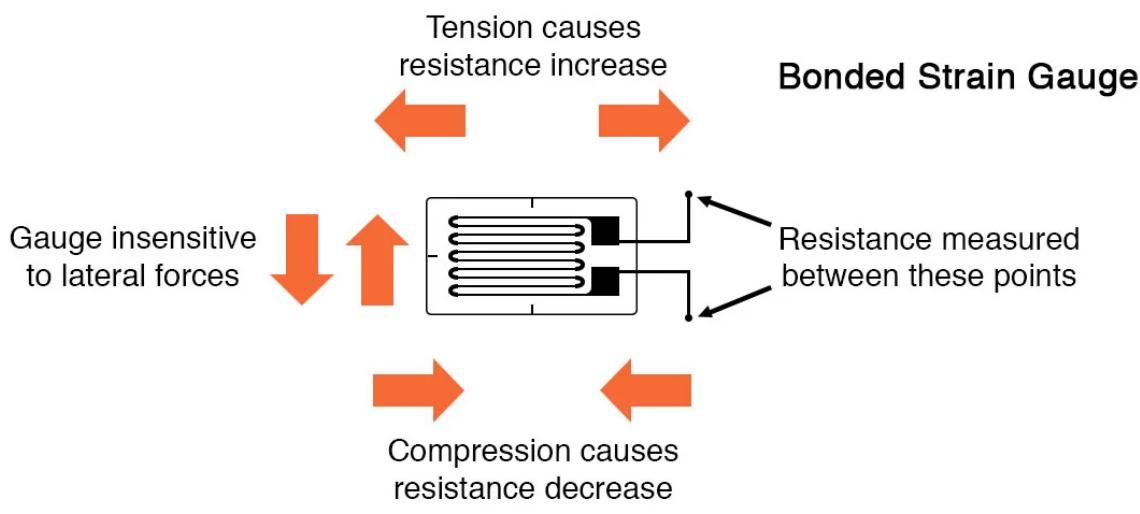


รูปที่ 1 Single Point Load Cell

ที่มา: <https://www.flintec.com/learn/weight-sensor/load-cell/single-point>

Single Point Load Cell ถูกออกแบบมาเพื่อวัดน้ำหนักอย่างแม่นยำ แม้เมื่อโหลดถูกกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยมีคุณสมบัติรองรับการวางแผนนอกศูนย์กลางได้ ต่างจาก Load Cell ประเภทอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องวางแผนโหลดในตำแหน่งที่แม่นยำเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาด ซึ่งเกิดจากการออกแบบเชิงเรขาคณิตของ Single Point Load Cell ทำให้สามารถวัดน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง ไม่ว่าจะวางแผนโหลดที่ตำแหน่งใด

2. Strain Gauge คืออะไร

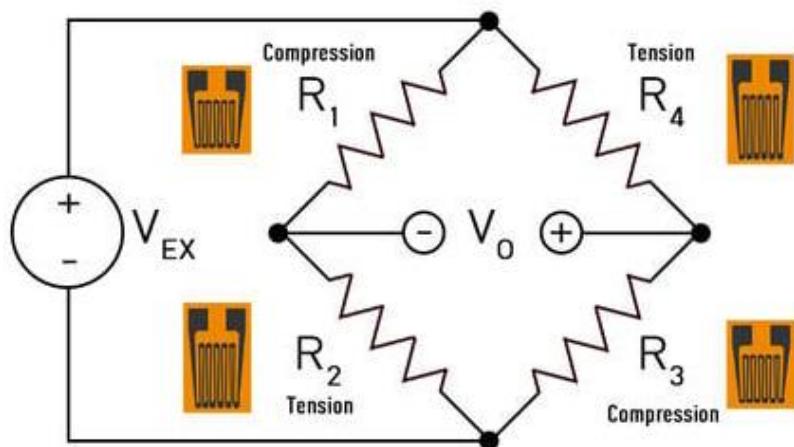


รูปที่ 2 Strain Gauge

ที่มา: <https://blog.endaq.com/strain-gauges-how-they-work-applications-and-types>

Strain Gauge เป็น Sensor ที่ความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามแรงที่กระทำ เช่น แรงดัน, แรงตึง, น้ำหนัก โดยจะเปลี่ยนแรงเหล่านี้ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดได้ เมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุที่หยุดนิ่ง จะเกิด Stress และ Strain โดยที่ Stress คือแรงต่อต้านภายในของวัตถุ ส่วน Strain คือการเคลื่อนและการเสียรูปที่เกิดขึ้น ทำให้หน้าที่หลักของ Strain Gauge คือการวัดค่า Strain ซึ่ง Strain นี้ประกอบด้วยแรงดึงและแรงอัด จึงสามารถใช้วัดทั้งการขยายตัวและการหดตัวของวัตถุได้

3. Wheatstone Bridge คืออะไร

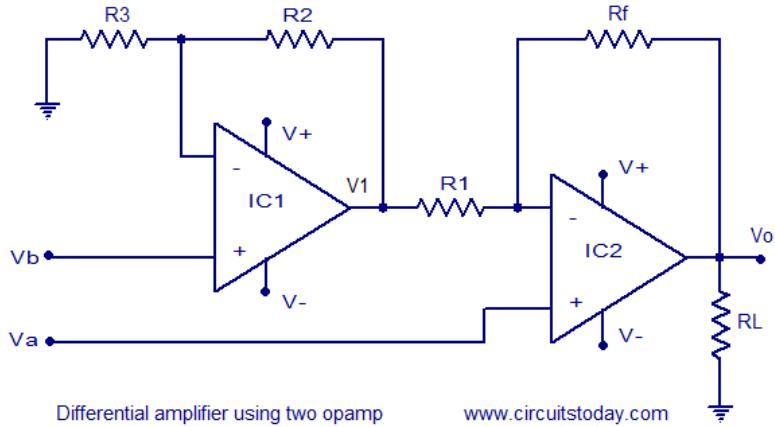


รูปที่ 3 วงจร Wheatstone Bridge

ที่มา: <https://www.800loadcel.com/white-papers/how-a-load-cell-works.html>

เพื่อให้แน่ใจว่าองค์ประกอบสปริงของ Strain Gauge จะมีการโค้งงอโดยเกิดการเสียรูปน้อยที่สุด การโค้งงอนี้จะต้องถูกจำกัดไว้ การคำนวนที่อ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเพียงเล็กน้อยของ Strain Gauge เพียงตัวเดียวจากความแม่นยำและมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดได้ เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงในการวัดของ Load Cell จึงมีการนำเอา Strain Gauge หลายตัว มาจัดเรียงในรูปแบบของ Wheatstone Bridge ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านทานรวมของ Strain Gauge ทั้งสี่ตัวสามารถคำนวนได้ด้วยสมการที่เหมาะสม โดย Wheatstone Bridge จะสมดุลหากสองของวงจรเพื่อให้ได้ความต้านทานที่มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งเป็นผลให้แรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทานด้วย ตามกฎของโอล์ม แต่แรงดันที่ได้รับจากการนี้ก็ยังมีขนาดที่น้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถนำมาประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จึงต้องขยายสัญญาณด้วย 2 Op-amps Differential Amplifier

4. 2 Op-amps Differential Amplifier

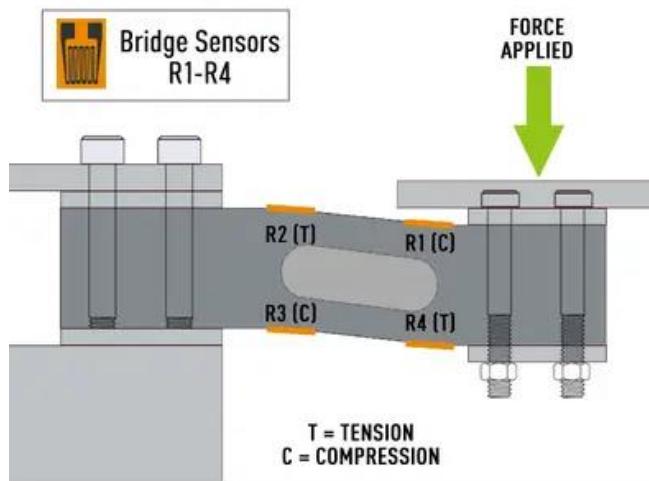


รูปที่ 4 หลักการทำงานของ Single Point Load Cell

ที่มา: <https://semesters.in/differential-amplifier-using-op-amp-notes-for-electronic-engineering-1st-year/differential-amplifier-using-two-opamps/>

Differential Amplifier ที่ใช้งาน Op-Amps สองตัวในการขยายสัญญาณ วงจรนี้ถูกออกแบบมาเพื่อยายสัญญาณ Input สองสัญญาณและให้ Output เป็นผลต่างระหว่างสองสัญญาณนั้น หลักการทำงานของวงจรนี้คือการนำสัญญาณ Input ทั้งสองเข้าสู่ Op-Amp แต่ละตัว จากนั้นผลลัพธ์จะถูกนำไปคำนวณผลต่าง เพื่อให้ได้สัญญาณ Output ที่ตรงตามความต้องการ ข้อดีของการใช้ Differential Amplifier คือความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนทำให้สัญญาณ Output มีความแม่นยำมากขึ้นในท้ายที่สุด

5. หลักการทำงานของ Single Point Load Cell



รูปที่ 5 หลักการทำงานของ Single Point Load Cell

ที่มา: <https://www.800loadcel.com/white-papers/how-a-load-cell-works.html>

Single Point Load Cell โดยพื้นฐานแล้วคือ Transducer ที่แปลงแรงหรือมวลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทำงานผ่าน Strain Gauge ที่ติดอยู่กับตัว Load Cell เมื่อมีการวางโหลดรูปทรงของ Load Cell จะเปลี่ยนรูปเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกตรวจสอบโดย Strain Gauge ที่บิดตามตัว Load Cell ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันนี้มีสัดส่วนกับแรงหรือมวลเริ่มต้น จึงสามารถนำมาใช้ในการคำนวณน้ำหนักได้

6. ตัวอย่างการใช้งานของ Single Point Load Cell

6.1 เครื่องชั่งน้ำหนักขนาดเล็ก (Bench Scales): เครื่องชั่งน้ำหนักติดตั้งitol ในร้านค้า หรือในห้องปฏิบัติการ

6.2 เครื่องบรรจุหีบห่อ (Packaging Machines): ใช้ในกระบวนการบรรจุหีบห่อ เพื่อให้ได้ปริมาณที่แม่นยำ

6.3 ระบบตรวจสอบน้ำหนักบรรทุก (Check Weighing Systems): เพื่อควบคุมการขนย้ายให้ได้ตามมาตรฐาน

7. การเลือก Single Point Load Cell

การเลือก Single Point Load Cell ควรพิจารณาหลายปัจจัยเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเริ่มจากความจุการรับน้ำหนักที่ต้องเลือกให้สูงกว่าโหลดสูงสุดที่จะใช้งานเล็กน้อย ความแม่นยำ วัสดุและความทนทาน รูปแบบการติดตั้ง สัญญาณออกและการเชื่อมต่อที่สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ควบคุม

8. ข้อดีและข้อเสียของ Single Point Load Cell

ข้อดี	ข้อเสีย
● ความแม่นยำสูง	● ข้อจำกัดในด้านน้ำหนัก
● การติดตั้งง่าย	● การบำรุงรักษา
● ความคุ้มค่า	● ความสามารถในการทนทานต่อแรงกระแทก
● ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	
● มีมาตรฐานและแพร่หลาย	

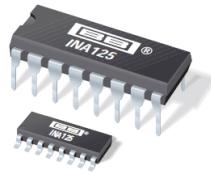
ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของ Single Point Load Cell

9. Datasheet และข้อมูลโดยคร่าวของ Single Point Load Cell และ Instrumentation Amplifier ที่ใช้ในการทดลอง

9.1 YZC-131A

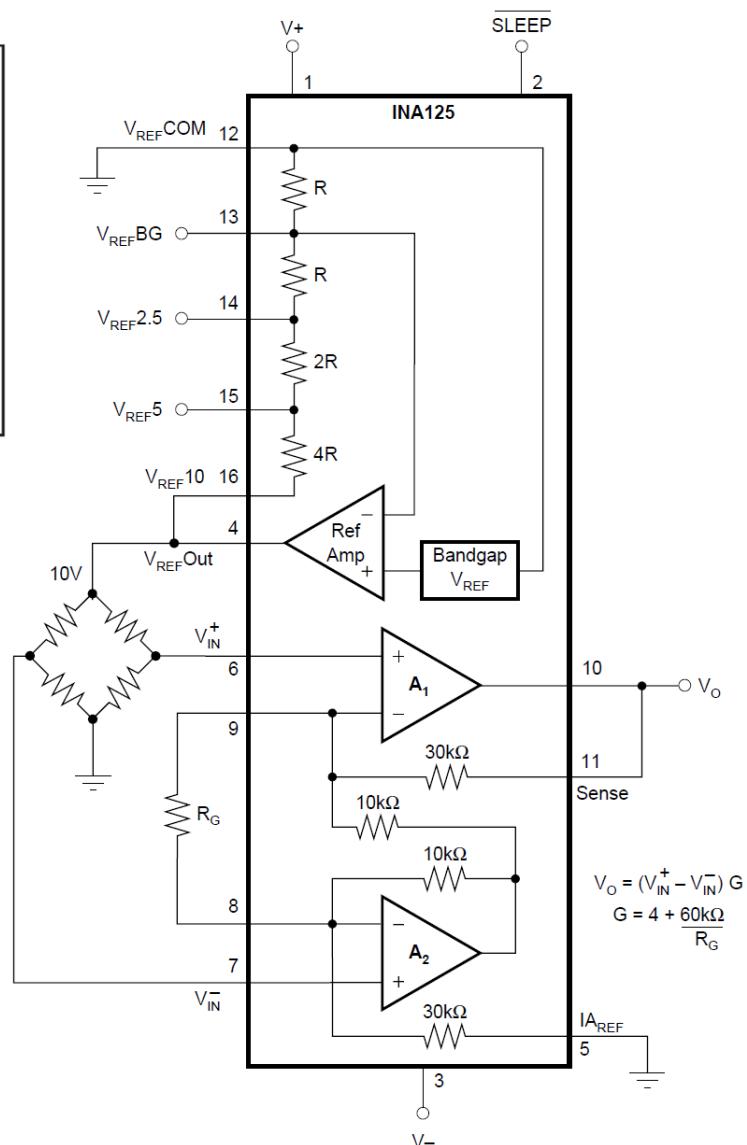
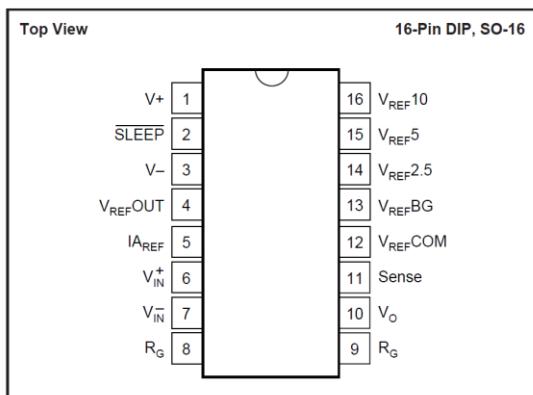


YZC-131A Series Product Specifications	
Mechanical	
Housing Material	Aluminum Alloy
Load Cell Type	Strain Gauge
Capacity	1/2/3/5 kg
Dimensions	Lx12.7x12.7 mm
Mounting Holes	M5 (Screw Size)
Cable Length	210 mm
Cable Size	30 AWG (0.2mm)
Cable - no. of leads	4
Electrical	
Precision	0.05%
Rated Output	1.0±0.15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


INA125

INSTRUMENTATION AMPLIFIER With Precision Voltage Reference

PIN CONFIGURATION



FEATURES

- LOW QUIESCENT CURRENT: 460 μ A
- PRECISION VOLTAGE REFERENCE: 1.24V, 2.5V, 5V or 10V
- SLEEP MODE
- LOW OFFSET VOLTAGE: 250 μ V max
- LOW OFFSET DRIFT: 2 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA max
- HIGH CMR: 100dB min
- LOW NOISE: 38nV/ \sqrt Hz at f = 1kHz
- INPUT PROTECTION TO \pm 40V
- WIDE SUPPLY RANGE
 - Single Supply: 2.7V to 36V
 - Dual Supply: \pm 1.35V to \pm 18V
- 16-PIN DIP AND SO-16 SOIC PACKAGES

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	Single Point Load Cell YZC-131A	1	อัน
2	INA125 Instrumentation Amplifier	1	อัน
3	3. Trimpot 100 K 25 Turns	1	อัน
4	Resistor 4.7K Ohm	1	อัน
5	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
6	บอร์ดทดลอง LoadCellXplorer	1	บอร์ด
7	สายอัปโหลด	1	เส้น
8	สายจำเปอร์ผู้-เมีย ความยาว 20 เซนติเมตร	3	เส้น
9	ถุงทรายน้ำหนัก 500 กรัม	21	ถุง
10	ตาชั่งดิจิตอล 5 กิโลกรัม	1	อัน
11	Digital Multimeter	1	อัน

ตารางที่ 2 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Single Point Load Cell
- วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ผู้จัดทำจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้
 - การทดลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Gain และ ค่าความต้านทานของ Single External Resistor ว่าส่งผลอย่างไรกับการวัดค่าของ Load Cell
 - การทดลองเพื่อ Signal Conditioning และ Calibrate Sensor เพื่อแสดงสัญญาณ Output แบบ Real Time เป็นน้ำหนัก ในหน่วย SI derived
- ทำการทดลองที่ 1 เพื่อดูลักษณะสัญญาณ Output และหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution
- ทำการทดลองที่ 2 เพื่อดูลักษณะสัญญาณ Output และหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution
- สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: แรงดันขาออกจาก Single Point Load Cell YZC-131A

ตัวแปรตาม: แรงดันขาออกจาก INA125, ค่า Gain ของ INA125

ตัวแปรควบคุม: วิธีการวัดแรงดันไฟฟ้า, น้ำหนักที่ใช้ในการชั่ง

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน LoadCellXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Ground ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 1 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
3. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin A0 ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 2 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
4. เสียบสายจ้มเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 3 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
5. วางน้ำหนัก 10 กิโลกรัมลงบน Load Cell และวัดค่าแรงดันขาออกจาก Load Cell ด้วย Digital Multimeter
6. คำนวณหาอัตราขยายที่เหมาะสม
7. ทดสอบอัตราขยายด้วยการวางถุงทรายน้ำหนัก 500 กรัมลงบน Load Cell โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 ถุง ซึ่งคือห้าเปอร์เซ็นต์ของช่วงน้ำหนักทั้งหมด
8. บันทึกค่าแรงดันขาออกและน้ำหนักที่ได้จากการประมวลผลที่ได้ทุก ๆ ห้าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไป
9. วิเคราะห์อัตราขยายที่ได้กับน้ำหนักที่วัดได้จริง

การทดลองเพื่อขอริบายความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Gain และ ค่าความต้านทานของ Single External Resistor ว่า ส่งผลอย่างไรกับการวัดค่าของ Load Cell โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ในการที่จะซึ้งน้ำหนักด้วย Single Point Load Cell YZC-131A ผ่าน Nucleo-STM32 นั้น ขนาดของ แรงดันไฟฟ้าที่ส่งเข้าไปที่ Nucleo-STM32 และจะสามารถนำไปประมวลผลได้จะต้องไม่มีขนาดที่เล็กจนเกินไป แต่ใน ความเป็นจริงแล้วแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Strain Gauge ภายใน Load Cell มีขนาดโดยปกติอยู่ที่ระดับ mV (มิลลิ โวลต์) ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กและไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการประมวลผลโดยตรงเนื่องจาก Nucleo-STM32 สามารถ รับสัญญาณ Digital ได้เพียง 12 Bit ซึ่งไม่ละเอียดมากพอ จึงต้องนำสัญญาณที่ได้จาก Load Cell โดยตรงต่อเข้ากับ INA125 เพื่อขยายสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่ Nucleo-STM32 สามารถประมวลผลได้

โดย INA125 เป็น IC Op-Amp ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ จึงจำเป็นจะต้องทดลองเพื่อหาอัตรายยาที่เหมาะสม ที่สุดก่อนจะใช้งาน Load Cell ต่อไป จากสมการที่มา กับ Datasheet

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

โดยที่

V_{out}	คือ แรงดันข้า梧จาก INA125 ในหน่วย V (โวลต์)
V_{in}^+	คือ แรงดันขาเข้า INA125 ด้านบวกซึ่งมาจาก Load Cell ในหน่วย mV (มิลลิโวลต์)
V_{in}^-	คือ แรงดันขาเข้า INA125 ด้านลบซึ่งมาจาก Load Cell ในหน่วย mV (มิลลิโวลต์)
G	คือ อัตรายยาของวงจร

และ G มีสมการคือ

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

โดย

G	คือ อัตรายยาของวงจร
R_G	คือ ค่าความต้านทานของ Single External Resistor

จากสมการจึงให้การหาค่า G มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการประมวลผลของ Nucleo-STM32 โดยตรง ซึ่งจากการสำรวจและศึกษา LoadCell Explorer พบร่วม INA125 ได้ถูก Offset แรงดันของ Op-Amp ภายในไว้ที่ $2.5V$ ทำให้สามารถอนุมานได้ว่าที่น้ำหนัก 10 กิโลกรัมตาม Rated Load ของ Load Cell จะทำให้ INA125 จ่ายแรงดันได้สูงสุดที่ $2.5V$

ผู้จัดทำจึงนำโอลด์น้ำหนัก 10 กิโลกรัมวางลงบน Load Cell เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Load Cell โดยตรง เพื่อหา $V_{in}^+ - V_{in}^-$



จากภาพ ผู้จัดทำได้นำน้ำหนักทั้งหมด 9,983 กรัม วางบน Load Cell โดยตรง และวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Strain Gauge ภายใน Load Cell โดยตรง ได้เท่ากับ 4.1 mV (มิลลิโวลต์)

ซึ่งเมื่อแทนค่าของข้อมูลที่มีทั้งหมด จะได้ว่า

$$2.5V = 4.1mV \times G$$

ดังนั้น

$$G \approx 609.75$$

จากนั้นจึงแทนในสมการ G

$$609.75 = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

ดังนั้น

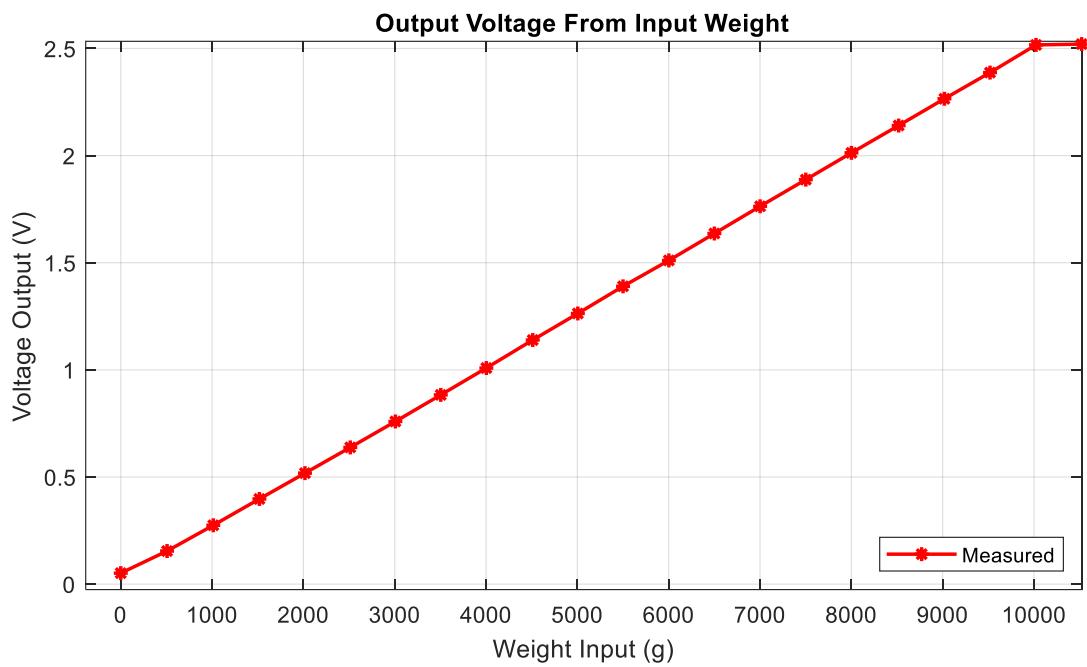
$$R_G \approx 99.05\Omega$$

จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานของ Single External Resistor ที่ต่อเข้ากับ INA125 ต้องมีค่าเท่ากับ 99.05Ω เพื่อให้การขยายสัญญาณจาก Load Cell มีความละเอียดมากที่สุดเท่าที่บอร์ดทดลองถูกออกแบบมา แล้วจึงปรับค่า R_G บนบอร์ดทดลองตามที่คำนวณออกมาได้เพื่อเช็คความสอดคล้องกับค่าน้ำหนักความเป็นจริง โดยการทดสอบด้วยถุงทรายน้ำหนัก 500 กรัม โดยเก็บค่าทุก 5% ของช่วง 10,000 กรัม ที่จุดละ 1,001 ค่า และนำไปหา Root Mean Square เพื่อให้ได้ค่าที่มีความเที่ยงตรง

```
V_out = rms(RAW_DATA.Data); % แปลงค่า Vrms (RAW_DATA คือตำแหน่งสำหรับใส่ข้อมูล .mat ที่เก็บมา)
```

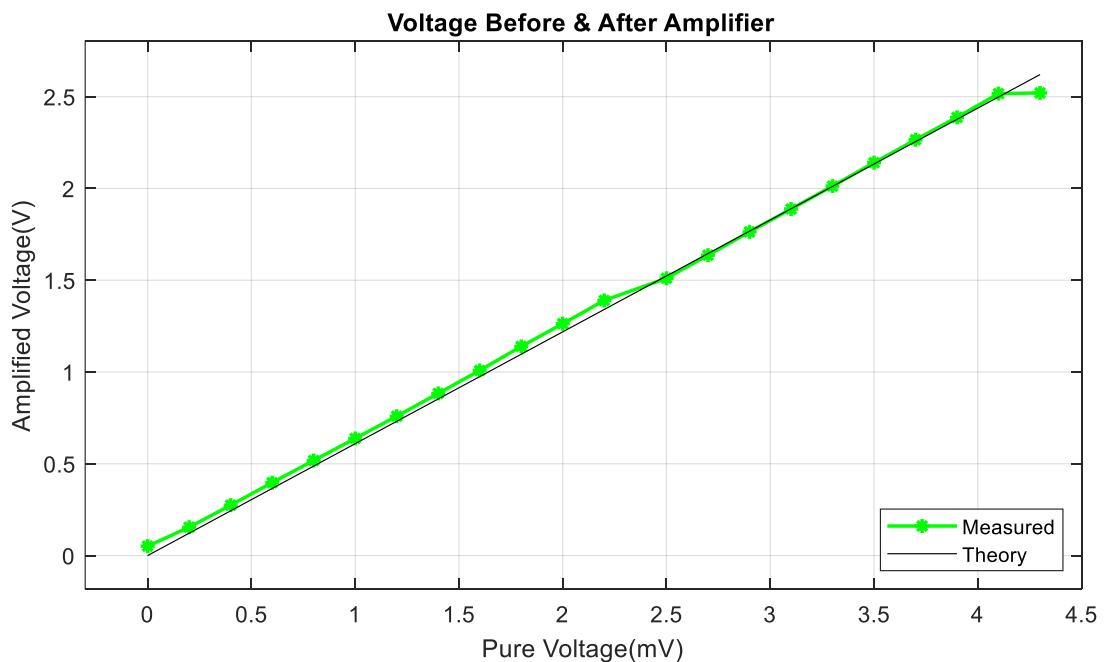
Code ที่ 1 collect_data.m

ผลการทดลองที่ 1



กราฟที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากการ INA125 ต่อน้ำหนักที่วางบน Load Cell

จากการจะสังเกตเห็นได้ว่าที่จุดน้ำหนักที่วางเป็นศูนย์ จะยังมีแรงดันไฟฟ้าอุกมาประมาณ 51.3 mV และหลังจากที่น้ำหนักเพิ่มขึ้นจนถึงจุด 10,000 กรัม แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2.52 V โดยน้ำหนักที่มากกว่า 10,000 กรัม จะก่อให้เกิดแรงดันคงที่ที่ประมาณ 2.52 V



กราฟที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125 ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell

จากการจะสังเกตเห็นได้ว่าชุดข้อมูลที่วัดจริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็นเล็กน้อย และหลังจาก 4.1 mV แรงดันที่วัดได้ก็จะเกิดการ Saturate ค้างอยู่ที่ค่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไป โดยเส้นทฤษฎีเกิดจากการนำ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell คูณกับอัตราขยายโดยตรงจึงเห็นได้ว่ามีความ Linear มาก ซึ่งความคลาดเคลื่อน สามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125 ต่อน้ำหนักที่วางบน Load Cell ที่จุดน้ำหนักที่วางเป็นศูนย์ ยังมีแรงดันไฟฟ้าออกมาประมาณ 51.3 mV ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไป Signal Conditioning ในการทดลองถัดไป และหลังจากที่น้ำหนักเพิ่มขึ้นจนถึงจุด 10,000 กรัม แรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2.52 V ซึ่งตรงกับความต้องการหลักของ การขยายสัญญาณในช่วงแรก โดยน้ำหนักที่มากกว่า 10,000 กรัม จะก่อให้เกิดแรงดันคงที่ที่ประมาณ 2.52 V ซึ่งเป็น การ Saturate ตามคุณสมบัติที่ถูกตั้งค่าไว้จากบอร์ดทดลองของ Op-Amp

ถัดไป จากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125 ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell ชุดข้อมูลที่วัดจริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็นเล็กน้อย และหลังจากที่แรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell ถึงจุด 4.1 mV แรงดันที่วัดได้ก็จะเกิดการ Saturate ค้างอยู่ที่ค่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไป ตามคุณสมบัติของ Op-Amp ซึ่งความคลาดเคลื่อนสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น Noise ภายใน Op-Amp หรือความไม่เสถียรของอัตราขยายภายใน Op-Amp

การทดลองที่ 2

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักที่ควรจะเป็น

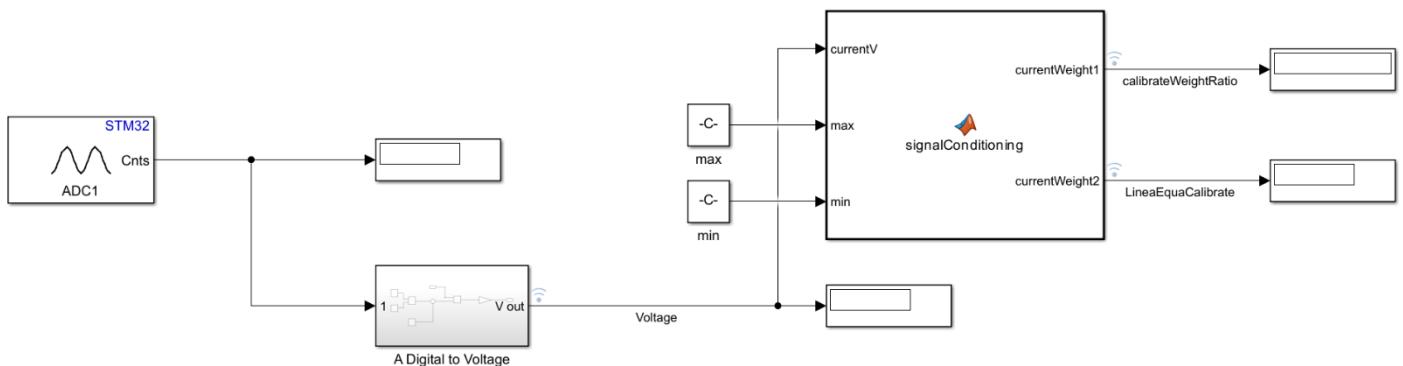
ตัวแปรตาม: น้ำหนักที่ Nucleo-STM32 ประมวลผล

ตัวแปรควบคุม: แรงดันขาออกจาก INA125, ค่า Gain ของ INA125

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน LoadCellXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Ground ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 1 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
3. เสียบสายจ้มเปอร์จาก Pin A0 ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 2 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
4. เสียบสายจ้มเปอร์จากแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3V ของ Nucleo-STM32 เข้าขาที่ 3 ของ INA125 บนบอร์ดทดลอง
5. วางถุงทรายหนัก 500 กรัมลงบน Load Cell โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 ถุง ซึ่งคือห้าเปอร์เซ็นต์ของช่วงน้ำหนักทั้งหมด
6. บันทึกค่าแรงดันขาออกและน้ำหนักที่ได้จากการประมวลผลที่ได้ทุก ๆ ห้าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไป
7. เปรียบเทียบวิธีการ Signal Conditioning รูปแบบต่าง ๆ และทดสอบอีกครั้ง

การทดลองเพื่อ Signal Conditioning และ Calibrate Sensor เพื่อแสดงสัญญาณ Output แบบ Real Time เป็นน้ำหนัก ในหน่วย SI derived โดยมีการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Function อื่น ๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 6 LoadCell.slx

LoadCell.slx เป็นโมเดล Simulink ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital บน Nucleo-STM32 โดยส่งสัญญาณ Digital ขนาด 12-Bit ไปเข้าสมการ Digital-Analog Converter เพื่อแปลงให้เป็นตัวเลขแรงดันของในหน่วยโวลต์อีกครั้ง เช่นเดียวกับใน Poten1.slx แล้วจึงส่งค่าแรงดันที่ได้ไป Signal Conditioning ต่อ ใน Function signalConditioning

```
function [currentWeight1] = signalConditioning(currentV, max, min)
%Measured 1 : Ratio
range = max-min;
ratio = (currentV-min)/range;
currentWeight1 = ratio * 10000;
end
```

Code ที่ 2 signalConditioning Function V1

โดยในครั้งแรกที่ทำการ Signal Conditioning ได้ใช้วิธีการเทียบสัดส่วนเบอร์เซ็นต์ก่อนจะนำไปคูณให้ได้ออกมาเป็นค่าน้ำหนักในหน่วยกรัม ซึ่ง max และ min คือแรงดันที่รับเข้ามาเมื่อมีน้ำหนักมากจนถึงจุดที่ Saturate และแรงดันเมื่อไม่มีน้ำหนัก gwagbn Load Cell ตามลำดับ แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์วิธีนี้ยังเกิดความคลาดเคลื่อนที่ยะเกินกว่าจะรับได้

จึงเปลี่ยนวิธีการ Signal Conditioning จากการเทียบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์เป็นการใช้สมการเส้นตรงอ้างอิงจากกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125 ต่อน้ำหนักที่วางบน Load Cell โดยนำชุดข้อมูลของกราฟนั้น ๆ ไปเข้าคำสั่ง polyfit ภายใน MATLAB ซึ่งให้ค่าความชันและจุดตัดแกน Y ออกมาเป็นผลลัพธ์

$$y = mx + c$$

$$m = 4027.34386713426$$

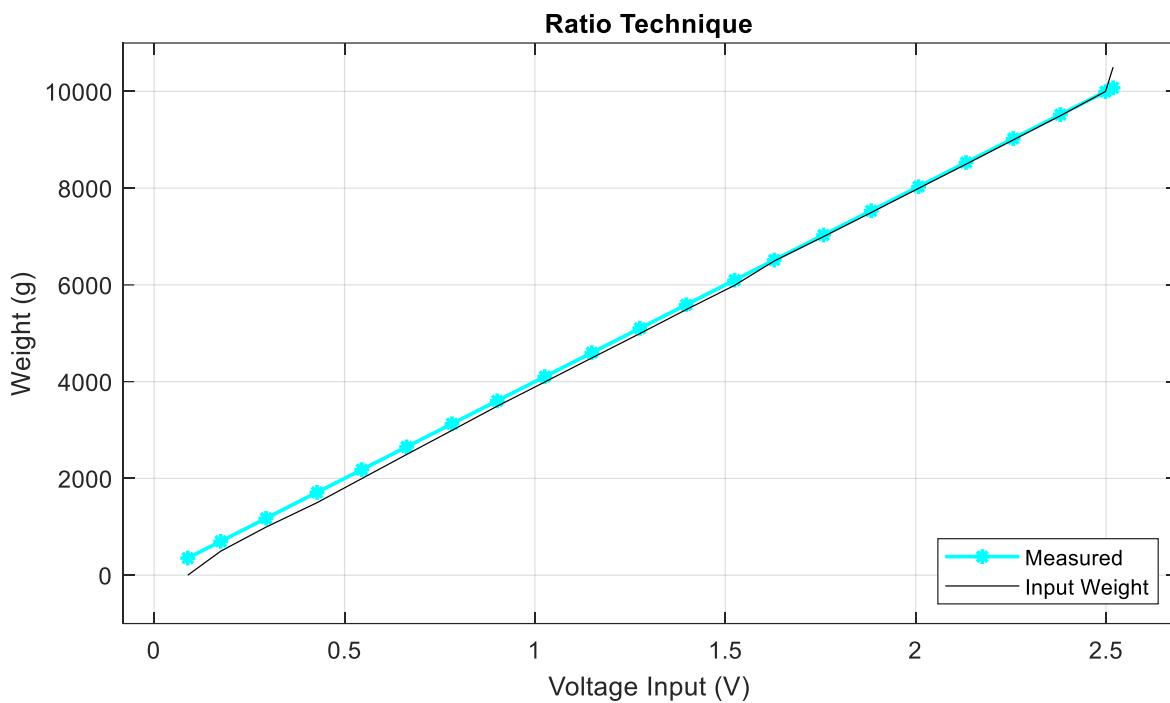
$$c = -92.3987738807251$$

```
function [currentWeight1,currentWeight2] = signalConditioning(currentV, max, min)
%Measured 1 : Ratio
%Measured 2 : Linear Equation
range = max-min;
ratio = (currentV-min)/range;
currentWeight1 = ratio * 10000;
currentWeight2 = (currentV * 4027.34386713426) - 92.3987738807251;
end
```

Code ที่ 3 signalConditioning Function V2

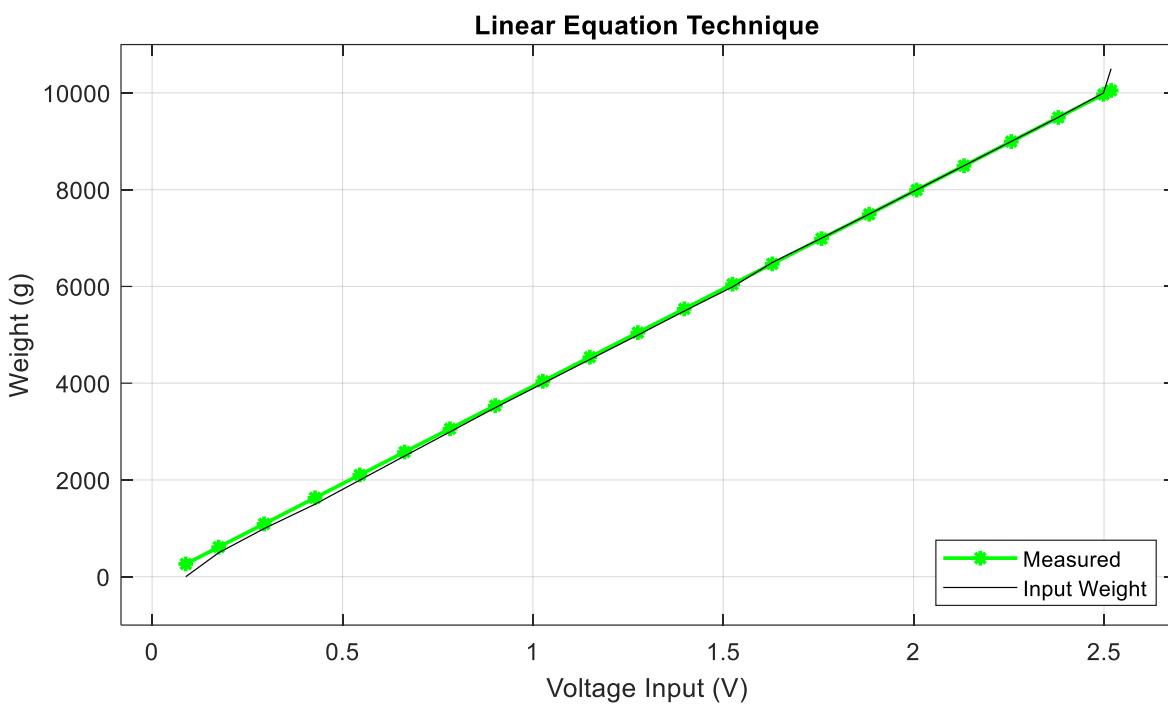
แล้วจึงนำมาเติมลงใน Function signalConditioning เพื่อทดลองเก็บค่าอีกครั้ง

ผลการทดลองที่ 2



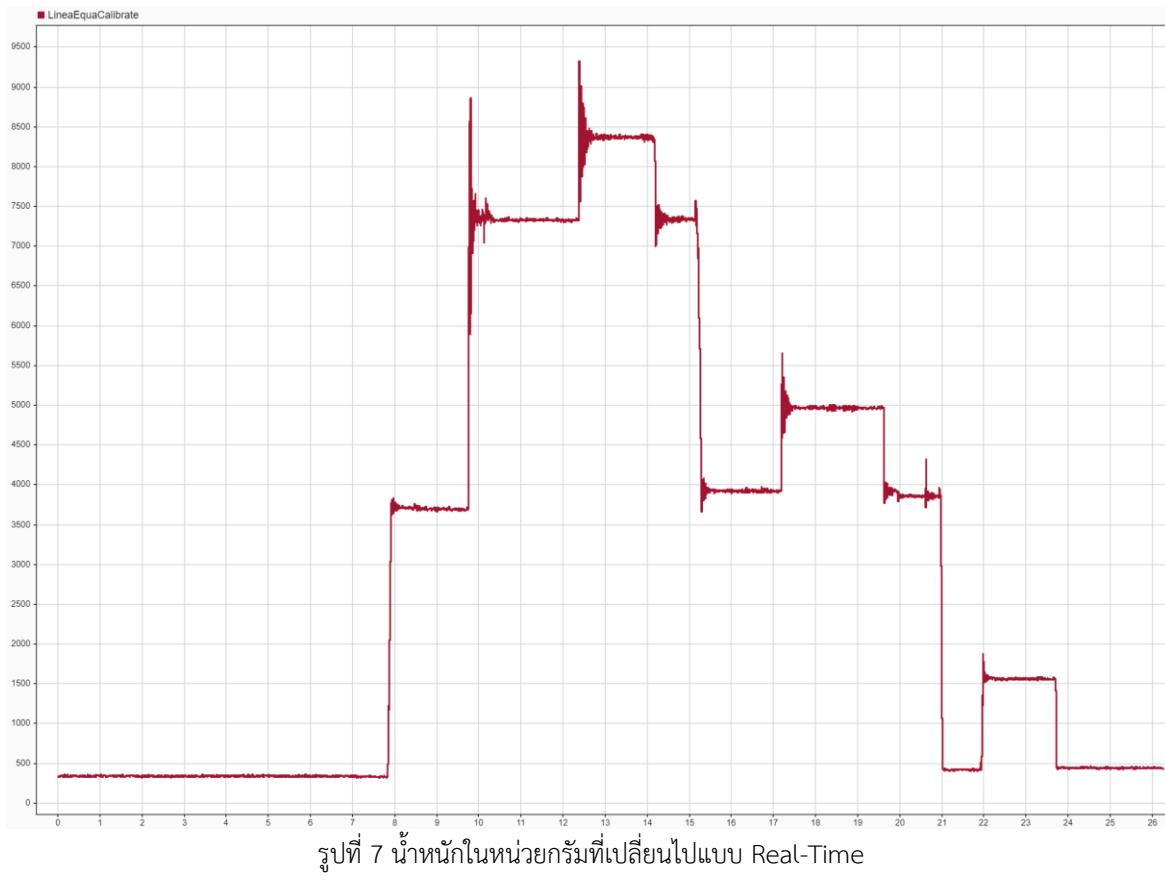
กราฟที่ 3 น้ำหนักที่ประมวลจากการเทียบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125

จากราฟเป็นข้อมูลที่ได้จากการเทียบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเป็นน้ำหนัก โดยจะเห็นได้ว่าที่จุดเริ่มต้น น้ำหนักจากการประมวลผลไม่ได้เริ่มต้นที่ศูนย์ และในช่วงครึ่งแรกของกราฟ ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนจากน้ำหนักจริงยะเกินกว่าที่จะรับได้ ที่ประมาณ $\pm 150 \text{ grams}$



กราฟที่ 4 น้ำหนักที่ประมวลจากสมการเส้นตรงต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125

จึงเปลี่ยนมาใช้วิธีอ้างอิงสมการเส้นตรงจากชุดข้อมูลน้ำหนักที่รับเข้ามา ซึ่งมีจุดสังเกตหลักคือ ที่จุดเริ่มต้นมีค่า น้ำหนักที่ถูกประมวลผลอยู่ที่ประมาณ 260 กรัม แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักบน Load Cell ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงประมาณ 3,500 กรัม ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักมากจากการประมวลผลอย่างเห็นได้ชัด โดยลงลงเหลือประมาณที่ประมาณ $\pm 50 \text{ grams}$ และลดลงเรื่อยๆ เมื่อน้ำหนักยิ่งเพิ่มขึ้น



เมื่อนำค่าน้ำหนักไป Log สัญญาณและแสดงผลบน Data Inspector แล้ว เมื่อนำน้ำหนักขึ้นไปวางบน Load Cell และปล่อยจะเกิดการพุ่งเกินของค่าน้ำหนักอันเนื่องมาจากความเร่งจากแรงโน้มถ่วง เมื่อผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง ค่าน้ำหนักที่แสดงจะกลับมาคงที่ควบคู่กับ Noise ภายใน Strain Gauge เช่นเดิม

สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีการ Signal Conditioning ทั้ง 2 วิธี มีข้อดี-ข้อเสีย ที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นค่า Offset ที่จุดเริ่มต้นหรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของชุดข้อมูล ซึ่งคาดว่าอาจจะยังมีวิธีการเชิงคณิตศาสตร์ที่แม่นยำกว่า แต่ในวิธีการอ้างอิงสมการเส้นตรงที่ได้นำมาใช้ อ้างอิงจาก Line Of Best Fit เพียงเส้นเดียว ทำให้มีสมการเส้นตรงที่ได้ออกมาเพียงสมการเดียว เพื่อให้มีความ Linear มากรีด และยังสามารถแสดงผลแบบ Real-Time บน Data Inspector ได้ด้วยความคลาดเคลื่อนที่ไม่มากเกินไป อีกทั้งสเปคของตัว Load Cell ที่กว้างถึง 10 กิโลกรัม อาจจะมีผลทำให้การวัดน้ำหนักที่มีค่าไม่มาก เกิดความไม่แม่นยำขึ้นได้

อภิปรายผลการทดลอง

เมื่อมีแรงกระทำต่อ Load Cell เพิ่มขึ้น ค่าของสัญญาณ Output ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่สอดคล้องกับการตั้งค่า Gain ของ Differential Amplifier ที่ใช้ร่วมกัน

จากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก INA125 ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell สามารถบ่งบอกได้ว่าการตั้งค่า Gain ของ Op-Amp ส่งผลโดยตรงต่ออัตราส่วนของสัญญาณที่ได้จาก Load Cell

การปรับค่า Gain จากค่าความต้านทานของ Single External Resistor สูงขึ้น สัญญาณ Output จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเล็กน้อยได้ละเอียดยิ่งขึ้น

เมื่อขยายสัญญาณแล้วทำการวัดค่าจะทำให้การวัดค่านี้ความละเอียดมากขึ้นกว่าเก่า เพราะช่วงของสัญญาณที่สามารถรับรู้ได้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ช่วยให้เกิดความซัดเจนและสะดวกในการเข้าถึง

ถ้า MATLAB และ Simulink รับสัญญาณจาก Load Cell ที่เชื่อมต่อกับ INA125 Instrumentation Amplifier ผ่านบอร์ด Nucleo STM32G474RE ได้แบบ Real-Time จะสามารถแสดงความเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำต่อ Load Cell ได้ทันที ทำให้สามารถตรวจสอบค่าของแรงในหน่วย SI derived ได้อย่างถูกต้อง

จากรูปภาพน้ำหนักในหน่วยกรัมที่เปลี่ยนไปแบบ Real-Time เมื่อนำน้ำหนักวางลงบน Load Cell แล้วสัญญาณจะเปลี่ยนไปทันทีแบบ Real-Time เนื่องจากการประมวลผลใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความรวดเร็ว

เมื่อทำการ Calibrate Load Cell และ Signal Conditioning อย่างถูกต้อง สัญญาณ Output ที่ได้จาก Load Cell ที่เชื่อมต่อกับ Differential Amplifier จะสามารถใช้ในการคำนวณแรงที่กระทำต่อ Load Cell ได้อย่างแม่นยำ

ภายในการทดลองทั้งสองแบบมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน การ Calibrate และ Signal Conditioning สามารถช่วยให้คำนวณแรงที่กระทำต่อ Load Cell ได้อย่างแม่นยำแน่นอน ถ้าทำอย่างถูกต้อง ด้วยวิธีที่มีที่มาที่ไป

ข้อเสนอแนะ

- Load Cell ที่มี Rated Load น้อยลง เพื่อให้สามารถทดสอบได้ละเอียดมากขึ้น
- Trimpot ที่มีช่วงของความต้านทานที่ไม่กว้างจนเกินไป เพื่อให้สามารถปรับอัตราขยายได้แม่นยำขึ้น
- แผ่นอะคริลิคฐานรองของ LoadCellXplorer เกิดการโค้งองเมื่อนำมือหนักที่มากมาวางบน Load Cell ซึ่งส่งผลต่อการอ่านสัญญาณและ Noise
- ADC ที่สามารถอ่านได้ละเอียดมากขึ้น เพื่อให้การวัดแรงดันขนาดเล็กมีความแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

Potentiometer

1. <https://www.sameskydevices.com/blog/all-you-need-to-know-about-potentiometers>
2. <https://randomnerdtutorials.com/electronics-basics-how-a-potentiometer-works/>
3. <https://www.digikey.co.th/th/articles/the-complete-guide-to-potentiometers>
4. <https://www.technophiles.com/types-of-potentiometer-applications/>
5. <http://www.profess.co.th/17063896/สัญญาณrgbกวนคืออะไร>
6. <https://science.howstuffworks.com/electricity9.htm>
7. <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
8. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
9. <https://th.fmuser.net/content/?18112.html>
10. <https://islproducts.com/design-note/potentiometer-taper/>
11. <https://www.geeksforgeeks.org/schmitt-trigger/>

Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

1. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf>
2. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_\(Boundless\)/21%3A_Magnetism/21.1%3A_Magnetism_and_Magnetic_Fields](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_(Boundless)/21%3A_Magnetism/21.1%3A_Magnetism_and_Magnetic_Fields)
3. https://www.e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_flux_density
4. <https://se.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/hall-effect-sensors-guide>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=wpAA3qeOYiI>

Incremental Encoder

1. https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/incremental_encoder/
2. [https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/#:~:text=Incremental%20encoders%20generate%20a%20fixed,channels%20\(A%20and%20B\).](https://www.quantumdev.com/resource-library/incremental-encoder-basics/#:~:text=Incremental%20encoders%20generate%20a%20fixed,channels%20(A%20and%20B).)

Load Cell

1. <https://www.flintec.com/learn/weight-sensor/load-cell/single-point>
2. <https://www.800loadcel.com/white-papers/how-a-load-cell-works.html>
3. <https://www.omega.co.uk/prodinfo/StrainGauges.html>
4. <https://blog.endaq.com/strain-gauges-how-they-work-applications-and-types>
5. <https://resources.altium.com/p/wheatstone-bridges>
6. <https://www.eeeguide.com/differential-amplifier-with-two-op-amps/>